



**Pedro Miguel  
Pinto Fernandes**

**Eco-navegação para uma mobilidade elétrica,  
autónoma e partilhada**





**Pedro Miguel  
Pinto Fernandes**

**Eco-navegação para uma mobilidade elétrica,  
autónoma e partilhada**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira, Investigador Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.





**o júri / the jury**

presidente / president

**Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos**

Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

arguente

**Prof. Doutor Gonçalo Homem de Almeida Rodriguez Correia**

Professor Auxiliar, TUdelft-Delft University Technology

coorientador

**Prof. Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira**

Investigador Doutorado (nível 1), Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

A concretização desta dissertação de mestrado representa o fim de uma etapa importante na minha vida académica, e agradecer é uma maneira de reconhecimento e retribuição a todas as pessoas que de alguma forma colaboraram e me deram apoio durante esta fase.

Em primeiro lugar, quero agradecer à minha orientadora Professora Doutora Margarida Coelho, pela colaboração e orientação, ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Professor Jorge Bandeira um agradecimento especial pela atenção dada, por toda a disponibilidade demonstrada e pelo apoio e ajuda na parte prática.

À empresa PTV AG pela cedência da licença do software VISUM, bem como alguns tutoriais e guias que permitiram uma grande ajuda inicial.

Aos meus pais e irmã, estou sinceramente grato por todo o apoio e esforço que me proporcionaram ao longo da minha vida para que fosse possível tirar um curso académico e atingir os meus objetivos.

Por último, quero também agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos: UID/EMS/00481/2019-FCT - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; MobiWise (POCI-01-0145-FEDER-016426); DICA-VE (POCI-01-0145-FEDER-029463); inFLOWence (POCI-01-0145-FEDER-029679); Driving2Driverless (POCI-01-0145-FEDER-031923); Projeto Estratégico UID/EMS/00481/2019-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.



**keywords**

modeling; traffic volumes; travel times; emissions; shared vehicles; electric vehicles; shared vehicles;

**abstract**

Currently, emissions from the transport sector represent one of the main sources of air pollutants to the atmosphere bringing serious consequences for air quality and public health.

This masters dissertation aims to study and evaluate the performance in traffic using a macro simulation model.

Several scenarios were assessed with different penetrations of shared, electric and autonomous vehicles, in order to study the impact on CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions in terms of system emissions and per vehicle, in the direction Coimbra to Aveiro, via 2 routes (A1 and N235/IC2). In addition to the various scenarios simulated in *VISUM*, a pollutant emission calculation methodology for two typical Portuguese diesel and petrol vehicles was used, as well as an equation that relates velocity with consumption for an EV.

Validation of the traffic model, consisted in data of the Aveiro and Coimbra intercity mobility plans, *IMT* traffic volumes, and indicative travel times.

The results suggest that for a group of realistic combinations of alternative mobility penetration scenarios, system emissions show a reduction from 60% to an increase of 16% for CO<sub>2</sub> levels, and a reduction from 99% to an increase of 16% for NO<sub>x</sub> levels. Emissions per vehicle show a range from -50% to +1% and from -54% to +6% for CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> levels respectively. Therefore scenario 12 with a 33% and 18% penetration of shared vehicles and electric vehicles respectively, is the scenario with the biggest decrease when considering system emissions, and scenario 13 in terms of emissions per vehicle that have besides these penetrations of SVs and EVs, a penetration of 35% autonomous vehicles, when both routes are taken into account. In addition, critical sectors were analyzed on both routes for the base scenario, which proved to be similar. These critical sectors with high emission levels showed a relationship with the decrease in vehicle speeds, as well as the increase in the traffic volume, and vice-versa.



## palavras-chave

modelação, volumes de tráfego, tempos de viagem, emissões, veículos partilhados, veículos elétricos, veículos autónomos

## resumo

Atualmente, as emissões provenientes do sector do transporte representa uma das principais fontes emissoras de poluentes para a atmosfera trazendo consequências graves para o nível da qualidade do ar e da saúde pública. Esta dissertação de mestrado tem como objetivo estudar e avaliar a penetração de veículos partilhados, elétricos e autónomos no desempenho no tráfego, utilizando um modelo macroscópico.

Foram realizados vários cenários com diferentes penetrações de veículos partilhados, elétricos e autónomos, de forma a estudar o impacto das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em termos de emissões por sistema e por veículo, no sentido Coimbra a Aveiro, através de 2 rotas (A1 e N235/IC2). Além dos vários cenários simulados no *VISUM* uma metodologia de cálculo de emissão de poluentes para dois veículos convencionais portugueses a diesel e gasolina foi usada, assim como uma equação que relaciona a velocidade com o consumo, para um VE.

A validação do modelo de tráfego consistiu na recolha de dados dos planos intermunicipais de mobilidade de Aveiro e Coimbra, de volumes de tráfego do *IMT*, e tempos de viagem indicativos.

Os resultados sugerem que para um conjunto de combinações realistas de cenários de penetração de mobilidade alternativa, as emissões do sistema mostram uma redução de 60% a um aumento de 16% para os níveis de CO<sub>2</sub>, e uma redução de 99% a um aumento de 16% para os níveis de NO<sub>x</sub>. As emissões por veículo variam num intervalo de -50% a +1% e -54% a +6% para os níveis de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> respetivamente. Assim o cenário 12 com uma penetração de 33% veículos partilhados e 18% de veículos elétricos, é o cenário com a maior diminuição quando é tido em conta as emissões no sistema, e o cenário 13 em termos de emissões por veículo que além de conter uma penetração de 33% veículos partilhados e 18% veículos elétricos, contém 35% de veículos autónomos quando ambas as rotas são consideradas.

Além disto foram analisados pontos críticos em ambas as rotas para o cenário base, que demonstraram ser semelhantes. Estes pontos críticos com altos níveis de emissões mostraram uma relação com a diminuição das velocidades dos veículos, assim como o aumento do volume de tráfego, e vice-versa.





# Índice

<b>I</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
1.1	Objetivos . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Literária</b>	<b>7</b>
2.1	Estado do tráfego e impacto nos consumos e emissões . . . . .	7
2.2	Veículos Autónomos . . . . .	7
2.2.1	Penetração no mercado . . . . .	9
2.3	Veículos Autónomos e Partilhados . . . . .	11
2.3.1	Penetração no mercado . . . . .	12
2.4	Veículos Autónomos Elétricos e Partilhados . . . . .	13
2.5	Modelação macroscópica . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>17</b>
3.1	Limites do modelo . . . . .	18
3.2	Caso de estudo: Aveiro - Coimbra . . . . .	18
3.3	Simulação . . . . .	20
3.4	Cenário base . . . . .	21
3.5	Cenários alternativos . . . . .	25
3.5.1	Penetração de VPs no mercado . . . . .	25
3.5.2	Penetração de VEs no mercado . . . . .	25
3.5.3	Penetração de VAs no mercado . . . . .	26
3.5.4	Suposições de penetração de mobilidade combinada . . . . .	26
3.6	Indicadores . . . . .	27
3.7	Validação . . . . .	29
3.8	Especificação de Rotas e Cenários . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Apresentação e Discussão de Resultados</b>	<b>35</b>
4.1	Comparação das emissões entre cenários . . . . .	35
4.1.1	Emissões do sistema . . . . .	37
4.1.2	Emissões por veículo . . . . .	41
4.2	Pontos críticos da rede . . . . .	45

<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>51</b>
5.1	Limitações . . . . .	52
5.2	Pesquisa futura . . . . .	53
	<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>63</b>

# Lista de Tabelas

3.1	Lista de cenários . . . . .	27
3.2	Dados da rede elétrica nacional [Fonte:ERSE] . . . . .	29
A.1	Lista dos tempos de viagem simulados . . . . .	64
A.2	Lista dos tempos de viagem observados . . . . .	64
A.3	Lista dos erros dos tempos de viagem simulados . . . . .	64
A.4	Lista dos volumes de tráfego observados e simulados . . . . .	65
A.5	Emissões do sistema por cenário . . . . .	66
A.6	Emissões por veículo por cenário . . . . .	67

Intentionally blank page.

# Lista de Figuras

2.1	SAE níveis de automação, Fonte: [SAE (2018)] . . . . .	8
2.2	Penetração no mercado para diferentes níveis de automação, caso base, [Fonte: Nieuwenhuijsen et al. (2018)] . . . . .	10
2.3	Penetração no mercado para diferentes níveis de automação, caso otimista, [Fonte: Nieuwenhuijsen et al. (2018)] . . . . .	10
2.4	Quantidade de carros partilhados por 100 mil habitantes na Holanda, [Fonte: (Kpvcrow 2017)] . . . . .	12
2.5	Custo associado ao serviço de transporte doméstico diário, [Fonte: Weiss et al. 2017] . . . . .	13
3.1	Fluxograma . . . . .	17
3.2	Área utilizada no estudo . . . . .	18
3.3	Volume de tráfego da Região de Coimbra na hora de ponta da manhã [Fonte: PIMP-Coimbra . . . . .	19
3.4	Volume de tráfego da Região de Aveiro [Fonte: Plano Intermunicipal de Aveiro] . . . . .	20
3.5	Lista de zonas . . . . .	21
3.6	Modelo de 4 etapas. Adaptado de (Hamilton 2015) . . . . .	22
3.7	Função Logit . . . . .	23
3.8	Mapa com as vias de tráfego usadas na simulação . . . . .	24
3.9	Mapa com os volumes de tráfego obtidos na simulação para cenário base .	24
3.10	Curva do Consumo de energia em função da velocidade . . . . .	29
3.11	Visualização do volume de veículos para cada <i>link</i> . . . . .	30
3.12	Rota 1 - A1 (Fonte: <i>VISUM</i> ) . . . . .	32
3.13	Rota 2 - N235 e IC2 (Fonte: <i>VISUM</i> ) . . . . .	33
3.14	Capacidade de uma via em proporção à penetração de veículos autónomos [Fonte: AutonomousDriving 2016] . . . . .	34
4.1	Curva do nível de: a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> , em função da velocidade . . . . .	36
4.2	Curva do nível de CO <sub>2</sub> em função da velocidade para os diferentes cenários	36
4.3	Curva da velocidade em função do volume/capacidade: a) cenário 1-rota 1, b) cenário 1-rota 2, c) cenário 4-rota 1, d) cenário 6-rota 1, e) cenário 6-rota 2, f) cenário 10-rota 2 . . . . .	37
4.4	Emissões no sistema de: a) CO <sub>2</sub> , b) No <sub>x</sub> . . . . .	38
4.5	Curva da velocidade em função do volume/capacidade para o cenário 13 na rota 1 . . . . .	40

4.6	Curva do nível de CO <sub>2</sub> (à esquerda) e de NO <sub>x</sub> (à direita) em função da velocidade para:a)cenário 1 - rota 1, b)cenário 1 - rota 2, c)cenário 4 - rota 1, d) cenário 9 - rota 1, e) cenário 6 - rota 2, f)cenário 13 - rota 1 . .	42
4.7	Emissões por veículo: a)CO <sub>2</sub> , b)NO <sub>x</sub> . . . . .	43
4.8	Curva do nível de CO <sub>2</sub> em função da velocidade para o cenário 12 e rota 1	45
4.9	Escala com intervalos de:a)CO <sub>2</sub> , b)NO <sub>x</sub> . . . . .	45
4.10	Mapa de emissões:a)rota 1-CO <sub>2</sub> , b)rota 1-NO <sub>x</sub> , c)rota2-CO <sub>2</sub> , d)rota2-NO <sub>x</sub>	46
4.11	a)Oliveira do Bairro, A1; b)Barcouço, A1; c)Bairro de Santa Apolónia, IC2	47
4.12	a)Troço A1-A14 e IC2 em Santa Apolónia; b)Mealhada, A1; c)Zona Industrial de Aveiro, A1 . . . . .	47
4.13	a)Famalicão, IC2; b)Santa Luzia, IC2; c)Zona Industrial de Aveiro, EN235	48
4.14	a)São Bernardo, EN235; b)Oliveira do Bairro, EN235; c)Pampilhosa, IC2	48
4.15	Escala com intervalos de:a)velocidades correntes dos carros em km/h, b) volume de veículos ligeiros . . . . .	49
4.16	Mapa de velocidades atuais dos carros em km/h (à esquerda) e volume de veículos ligeiros (à direita): a) rota 1, b) rota 2 . . . . .	50
A.1	a) Rota 1 - A1, b) Rota 2 - N235/IC2 [Fonte:Google Maps] . . . . .	63

# Lista de Abreviaturas

VE	Veículo Elétrico
VA	Veículo Autônomo
VP	Veículo Partilhado
VPA	Veículo Partilhado e Autônomo
VPE	Veículo Partilhado e Elétrico
VEA	Veículo Elétrico e Autônomo
VP AE	Veículo Partilhado Autônomo e Elétrico
VBE	Veículo de Bateria Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VCI	Veículo de Combustão Interna
GEE	Gases Efeito de Estufa
QPV	Quilómetros Percorrido por Veículo
VCE	Veículo de Carga Elétrico
SAAC	Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor
CCA	Controlo de Cruzeiro Adaptativo
PCF	Prevenção de Colisão Frontal
PCL	Prevenção de Colisão Lateral
AFD	Assistência de Faixa de Rodagem
SCA	Sistemas de Condução Automatizados
PVE	Potência de Veículo Específica
PM	Matéria Particulada
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
NO <sub>x</sub>	Oxidos Nitrosos

Intentionally blank page.



**Parte I**

**Introdução**



# Capítulo 1

## Introdução

Se for levado em consideração que os veículos privados são usados durante muito pouco tempo, sendo este tempo principalmente no percurso casa/trabalho, e que apesar da melhoria de infraestruturas e da eficiência dos veículos, muitos acidentes e mortes continuam a ocorrer, irá ser concluído que uma das razões para estes acontecimentos são devidos ao condutor, ou seja, ao erro humano (Ministry of Road Transport & Highways-India 2019). O relatório lançado pela (WHO 2018) destaca que o número anual de mortes provocadas por acidentes de carro atingiu 1.35 milhões de pessoas. As lesões na circulação rodoviária são agora a principal causa de morte de pessoas com idades compreendidas entre os 5 e 29 anos. Este relatório ainda sugere que é necessária uma ação drástica para implementar medidas que cumpram qualquer objetivo que possa vir a ser implementado no futuro e salve vidas.

Em vez disso, o problema pode ser redefinido pela forma como se utiliza o transporte individual. Caso os carros sejam capazes de conduzir autonomamente, sem a necessidade da intervenção humana, não haveria razão para serem mantidos em lugares perto de casa e trabalho, permitindo assim libertar muitos lugares de estacionamento. Ainda mais lógico seria usar um veículo autónomo em conjunto com um serviço de partilha de veículos e a tecnologia elétrica, criando assim uma forma de transporte mais sustentável e segura.

Atualmente o setor dos transportes é o maior consumidor de combustíveis fósseis, o que se traduz num dos maiores libertadores de gases efeito de estufa (GEE). Na UE (União Europeia), este setor representa 33% do consumo de energia (2016) e é responsável por 21% dos GEE (Xiang *et al.* 2016);(European Commission 2018). Também é mencionado por (Wieczorek *et al.* 2012) que existe uma grande dependência de combustíveis fósseis, que resulta numa grande perda de biodiversidade e poluição geral do meio ambiente, situações estas que requerem políticas inovadoras e mudanças tecnológicas.

Nos últimos anos, a quantidade de veículos privados tem vindo a aumentar, o que resulta num maior volume de tráfego, causando maiores impactos negativos para o ambiente. Em Portugal, no ano de 2014, as estradas e autoestradas rurais representam 58% do total de quilómetros percorridos. E portanto, é importante que a utilização de veículos rodoviários seja reduzida, promovendo assim outros tipos de mobilidade, assim como a utilização do transporte público (Boyaci *et al.* 2015).

Por um lado, o transporte oferece várias oportunidades para as pessoas, essenciais para uma mobilidade. Por outro lado, é acompanhado de vários efeitos negativos.

(Rodrigue *et al.* 2013) resumiu alguns dos principais problemas associados ao transporte como as alterações climáticas, a qualidade do ar e da água, a perda de biodiversidade e a poluição sonora. A exposição repetida e continuada a estímulos sonoros de níveis superiores a 85 dB (decibéis) pode levar a danos irreversíveis nas células ciliares e, consequentemente a perda de qualidade auditiva. Estima-se que, em Portugal, o tráfego rodoviário expõe mais de cinco milhões de habitantes a níveis de ruído excessivos (CIM-Aveiro 2014).

Assim sendo, um dos objetivos para obter um setor de transportes sustentável com um menor nível de emissões associado, é a utilização mais eficiente das infraestruturas rodoviárias através da alocação mais inteligente do tráfego na rede (Cauwer *et al.* 2015);. Segundo (Tu *et al.* 2016) e (Škugor *et al.* 2016), um dos caminhos para um transporte mais sustentável, passa pela eletrificação dos veículos. Estudos feitos anteriormente sugerem que um veículo elétrico (VE) pode poupar cerca de 6 cêntimos por quilómetro e reduzir 50% das emissões GEE, comparativamente a um veículo convencional (Mak *et al.* 2013). O problema da tecnologia dos veículos elétricos é o seu custo de produção ser alto, a autonomia de condução ser limitada, e os tempos de carregamento serem longos, por volta das 4 horas ou mais (Jung *et al.* 2014);(WSDOT 2011).

À medida que os custos da tecnologia VE continuam a baixar e as instalações de carregamento se tornam mais convenientes em localizações favoráveis (Nie *et al.* 2013), os VEs se tornarão cada vez mais financeiramente vantajosos em relação aos veículos tradicionais movidos a petróleo. As projeções da adoção de VEs são muito modestas a curto prazo (1 a 7% das vendas de novos veículos em 2020) e variam a longo prazo (entre 2 a 30% das vendas de novos veículos em 2030) (Nykqvist *et al.* 2015); (Bloomberg 2016).

Além dos VEs, um outro método que contribui para atingir uma mobilidade urbana sustentável no setor dos transportes, segundo (Cohen *et al.* 2012) são os programas de partilha de veículos. A difusão do transporte partilhado altera significativamente a taxa de veículos privados, estima-se que cada partilha de veículo, remova 9 a 13 veículos das estradas (Greenblatt *et al.* 2015b), sendo a maior parte dos veículos privados usado menos que 10% do tempo (Fagnant *et al.* 2014). É estimado que a poupança para um americano médio, seja cerca de 6000 \$ por ano, se aderirem a um programa de transportes partilhado em vez de possuir um veículo privado (Anderson *et al.* 2014).

O objetivo da partilha de veículos é combinar os viajantes com itinerários semelhantes aos veículos disponíveis, reduzindo assim o número de veículos necessários na viagem. Serviços como a *UberPOOL* e a *Lyft Line*, têm mostrado grande potencial, melhorando a mobilidade em termos de acessibilidade e sustentabilidade. A adesão aos serviços *Zipcar* e *Car2Go*, aumentaram 34% de 2012 a 2014 na América do Norte, obtendo um total de 1.6 milhões de membros (Shaheen *et al.* 2018). Contudo a partilha de veículos induz desequilíbrios na distribuição do veículo pelo espaço, o que requer operações de realocação para maximizar a disponibilidade do veículo (Jorge *et al.* 2014). Uma estratégia de realocação eficaz é uma componente essencial para uma operação de partilha de veículos mais sustentável (Bruglieri *et al.* 2014), que pode ser implementada através da tecnologia autónoma.

Veículos autónomos (VAs) além de estarem a ser planeados para serem disponíveis comercialmente, têm sido promovidos de maneira a obter uma melhor segurança na condução, conforto do condutor e eficiência do veículo, trazendo benefícios como a redução de acidentes, redução do congestionamento de tráfego, e expandindo o acesso da mobilidade a populações reduzindo o uso do espaço em áreas urbanas (Anderson *et al.* 2014).

Além disto, têm o potencial para reduzir as emissões GEE no setor dos transportes, com uma redução estimada de 87 a 94 % em comparação com os veículos privados atuais nos Estados Unidos até 2030, principalmente graças à possibilidade de usar veículos dimensionados para uma viagem específica (Greenblatt *et al.* 2015a).

Atualmente com a descida dos preços na tecnologia de sensores e baterias, cada vez existem mais VEs a circular nas estradas, assim como o desenvolvimento dos VEAs se encontram em franco progresso. Além disso a chegada da tecnologia de comunicação 5G irá melhorar ainda mais a circulação dos veículos graças à sua conexão entre si e a uma nuvem (Ericsson 2019). Também a subida no mercado relativamente aos serviços de partilha de veículos pode causar uma mudança fazendo com que as pessoas abandonem os modelos de propriedade pessoal.

Até recentemente os fabricantes de carros eram os líderes da indústria automóvel, mas agora empresas como a Google, Uber e Tesla que são responsáveis pelo desenvolvimento de tecnologia autónoma, estão a entrar no mercado automóvel e de transporte. A entreaajuda de ambas as empresas irão contribuir para uma mudança no setor do transporte diferente da que se conhece hoje em dia (Investopedia 2019 ).

Os benefícios da automação da frota são refletidos de diversas maneiras. Primeiro, estes veículos são capazes de operar continuamente, apesar de serem necessários alguns intervalos para que sejam carregados. Além disso, a sua autonomia permite que não seja necessário condutores para manter o controlo do veículo, permitindo assim a este utilizar este tempo de viagem para realizar outras atividades. Por último, os veículos respondem a todas as solicitações de forma imediata, após serem recebidas. Os condutores humanos, por outro lado, podem rejeitar solicitações que não sejam convenientes ou podem facilmente perder uma solicitação sem ter prestado atenção. Este tipo de mobilidade poderá também ajudar os veículos a tomarem soluções otimizadas, tal como a escolha de rotas, e padrões de velocidade otimizados, minimizando assim o impacto ambiental (Apur 2018).

Um Sistema de veículos partilhados, autónomos e elétricos (VPAEs) podem ter um custo fixo relativamente alto devido ao custo de grandes baterias, que proporcionam um maior alcance antes do carregamento necessário, e uma infraestrutura de carregamento, porém pode reduzir os custos gerais através de menores necessidades de energia e manutenção. Espera-se também que os VEs reduzam os custos ambientais na maioria dos locais, especialmente onde as energias renováveis fazem parte da rede elétrica (Reiter *et al.* 2016).

Neste trabalho irá ser abordado a navegação de diferentes tipos de mobilidade, focando-se principalmente na forma como afeta o desempenho no tráfego, e no desempenho energético de todos os veículos presentes numa determinada rede viária.

## 1.1 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo avaliar de que maneira o impacto das emissões em termos de emissões de sistema e por veículo influencia a escolha de rotas através da aplicação de simulações em cenários com diferentes tipos de mobilidade (partilhada, elétrica e autónoma) entre duas cidades, Aveiro e Coimbra, para duas rotas (A1 e N235/IC2), usando o software *VISUM*, da empresa PTV Group. O objeto é avaliar o desempenho no tráfego de todos os veículos do ponto de vista macroscópico,

e estudar o impacto das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, em termos de emissões por sistema e por veículo.

Além disto, serão avaliados os pontos críticos, em ambas as duas rotas, em termos de emissões, velocidades, e volumes de tráfego.

O ano estimado deste trabalho será 2030, e os resultados obtidos após a simulação dos vários cenários serão para a hora de ponta da manhã, às 13h.

## Capítulo 2

# Revisão Literária

### 2.1 Estado do tráfego e impacto nos consumos e emissões

O consumo de energia de um veículo depende de vários fatores externos, tais como características do veículo e da via, condições ambientais, condições de tráfego, etc. Em particular a relação entre as condições de tráfego e o impacto ambiental têm sido objeto de vários esforços, tanto a nível tecnológico, como político (Fontaras *et al.* 2017).

O manual (TRBSpecial 2000) distingue três principais fatores que influenciam as características do fluxo em ambientes urbanos: o ambiente de rua, a interação entre veículos e o controle de tráfego.

O ambiente rodoviário é composto pelas suas características geométricas (por exemplo, número e largura das vias, velocidade limite) e a atividade na berma da estrada (por exemplo, estacionamento, ciclistas, peões). A interação entre os veículos é determinado pela densidade de tráfego, proporção de veículos pesados, e mudanças de direção, sendo estas interações mais presentes em interseções.

(Barth *et al.* 2008) mostrou que o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub> dos veículos de combustão interna (VCIs) podem ser reduzidas melhorando o congestionamento do tráfego. Estes autores analisaram o congestionamento do tráfego e o seu impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> usando modelos de emissão e energia detalhados, e ligando-os a padrões de condução reais e condições de tráfego. Os resultados para um cenário no sul da Califórnia mostraram que as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas até 20 % através da aplicação de diferentes estratégias de gestão de tráfego.

(Fiori *et al.* 2019) realizou estudos acerca da relação entre energia/consumo de combustível e condições de tráfego, com base em uma análise empírica. Os resultados mostraram que VEs e VCEs (veículos de carga elétricos) usam menos energia em cenários de congestionamento do que em cenários de fluxo livre, mostrando valores de consumo de energia constantes até 50 km/h e um aumento respetivo, devido ao aumento de velocidade. Nos resultados de VCIs, ocorreu exatamente o oposto, mostrando assim que condições de congestionamento são caracterizadas por um maior consumo de energia.

### 2.2 Veículos Autónomos

Muitos investigadores como (Fagnant *et al.* 2015) temem efeitos negativos de VAs. Eles esperam que os efeitos positivos sobre o fluxo de tráfego e os problemas de estaciona-

mento (Talebpour *et al.* 2016), bem como a capacidade de poder trabalhar durante a viagem (Looff *et al.* 2018), causará ruas congestionadas. Eles reconhecem que os VPAs poderiam ser a principal solução para este problema.

Os veículos estão equipados com cada vez mais sensores e atuadores para auxiliar, e eventualmente, substituir o condutor. Tanto a indústria, como as instituições de investigação, estão a investir imenso na pesquisa e desenvolvimento de sistemas avançados de assistência ao condutor (SAAC). Contudo, um carro que contém ADAS, não significa que seja autónomo. De acordo com a Sociedade Automóvel dos Engenheiros (SAE 2018), existem 6 níveis de automação. Na figura seguinte, uma descrição bastante precisa desses níveis são apresentados.

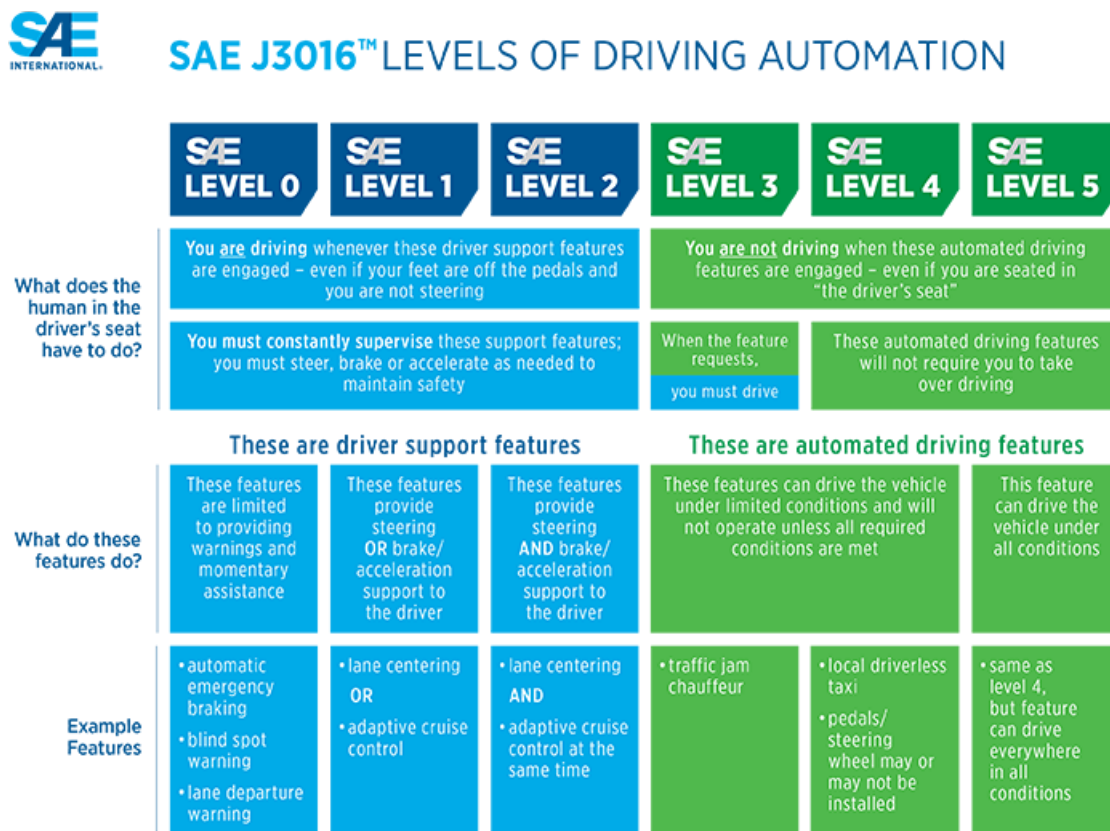


Figura 2.1: SAE níveis de automação, Fonte: [SAE (2018)]

Do nível 0 ao 2, o condutor é responsável por controlar o veículo. No nível 0 não existe automação, podendo no entanto apresentar sistemas de informação e aviso, tais como navegação, aviso de ponto cego e aconselhamento de velocidade. Do nível 1 para cima, os veículos são equipados com ADASs. Exemplos de SAACs são controlo de cruzeiro adaptativo (CCA), anti-colisão frontal (PCF) e assistência de faixa de rodagem (AFD). A distinção entre o nível 1 e nível 2, é feita através dos controlos longitudinais (PCF) e laterais (PCL). O nível 1 tem apenas um dos controlos, enquanto o nível 2 contém ambos. Os níveis 3 ao 5 (veículos de alta automação) são uma extensão dos SAACs parcialmente automatizada, a que se dá o nome de sistemas de condução automatizados (SCA). Os níveis 3 e 4 são considerados muito semelhantes, pois o condutor pode deixar o veículo



conduzir, enquanto faz outra coisa, no entanto precisa de estar preparado para intervir quando o sistema necessita. No entanto no nível 4, existem situações, por exemplo em autoestradas, onde o sistema consegue fazer tudo por ele próprio, até mesmo lidar com situações inesperadas. Por último, no nível 5, o veículo é totalmente autónomo, não necessitando de condutor, ou volante sequer.

(Bose *et al.* 2003) relatam que a integração de sistemas (CCA) com sistemas de prevenção de colisão frontal (PCF), permitem que a distância entre veículos seja muito menor, porque o veículo sempre será capaz de travar em eventos inesperados. (Saleh *et al.* 2013) desenvolveram e testaram um algoritmo projetado para partilhar o controle do veículo com o condutor, e os resultados mostraram uma redução em desvios de trajeto de cerca de 28.9%. Outros investigadores como (Berveling *et al.* 2017) sugerem que esta redução pode fazer com que os veículos conduzam muito mais juntos, abrindo possibilidades para reduzir a largura das estradas.

Além disso, (Fagnant *et al.* 2015) concluíram que uma melhor eficiência do combustível, benefícios de estacionamento e um menor número de acidentes, podem levar a que um VA se torne mais económico que um veículo convencional. Contudo estudos realizados por (Correia *et al.* 2016) mostraram que as reduções nos custos dos VAs, poderiam aumentar significamente a distância percorrida pelos veículos (QPV), e a quantidade de veículos nas estradas.

### 2.2.1 Penetração no mercado

(Milakis *et al.* 2015) apresentou um estudo acerca dos efeitos de VAs no fluxo de tráfego urbano. Contudo, os resultados são tanto positivos como negativos, dependendo da penetração dos VAs no mercado. Para baixas taxas de penetração, estimou-se que os VAs teriam uma pequena influência negativa na capacidade rodoviária, mas para taxas elevadas, a capacidade aumentará até 6 % até 2050 (AutonomousDriving 2016). As suas estimativas para estradas urbanas foram ligeiramente mais pessimistas do que para autoestradas, devido à quantidade de interseções sinalizadas e a interação no tráfego urbano.

(Underwood *et al.* 2014) realizou uma extensa pesquisa na engenharia robótica, automóvel e de transporte, e concluiu que a introdução do nível 3 nas autoestradas poderia ocorrer entre 2017 e 2019, a introdução do nível 4 entre 2024 e 2030, e a introdução do nível 5 entre 2025 e 2035

(Nieuwenhuijsen *et al.* 2018) estudaram a penetração na Holanda, dos VAs a todos os níveis de automação, para 2 cenários (um cenário base, e um otimista).

Como se vê na figura anterior, no caso base, o nível 2 é inicialmente o mais popular e alcança uma frota de 50 % até 2025, após chegar ao seu pico de 54 % de penetração no mercado em 2032, o nível 3 começa a subir até se cruzar com o nível 2 em 2045. O nível 3 atinge o seu máximo com 70 % em 2077, quando os veículos de nível 4 e 5 começam lentamente a penetrar no mercado. Para 2030 estima-se como se segue: nível 0-8%, nível 1-17%, nível 2-53%, nível 3-20%, nível 4 e 5-1 %.

No caso da figura 2.3, que representa o caso otimista, a penetração do nível 1,2 e 3 de automação é rápida e simultânea, e o nível 4 e 5 crescem rapidamente a partir do ano 2020. Para o ano de 2030 estima-se como se segue: nível 0-2%, nível 1-5%, nível 2-17%, nível 3-47%, nível 4-15% e nível 5-15%.

Charlie Simpson, que pertence à KPMG na Inglaterra, que é uma das maiores em-

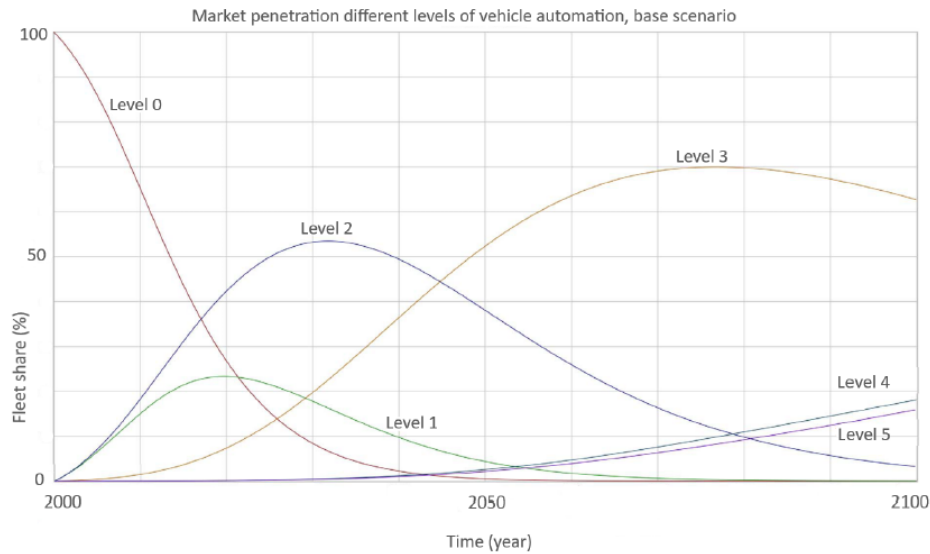


Figura 2.2: Penetração no mercado para diferentes níveis de automação, caso base, [Fonte: Nieuwenhuijsen et al. (2018)]

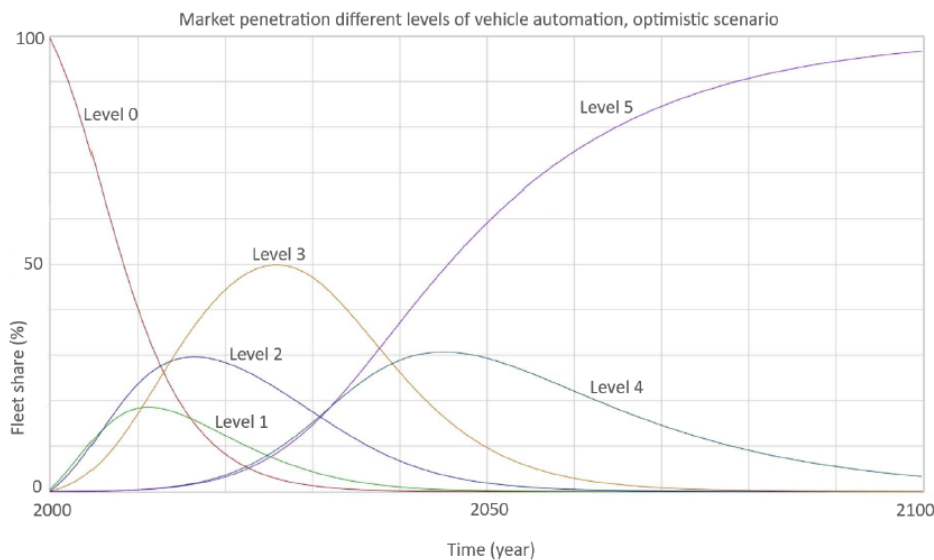


Figura 2.3: Penetração no mercado para diferentes níveis de automação, caso otimista, [Fonte: Nieuwenhuijsen et al. (2018)]

presas que presta serviços de auditoria, consultoria e fiscalidade, afirma que a adoção de veículos autónomos e conectados de nível 4 em Inglaterra, vai crescer a partir do ano 2020, tendo uma previsão da sua penetração para o ano de 2030, de cerca de 20 a 35% (KPM2019).

A McKinsey's Company apresenta dois cenários, um com baixas, e outro altas expectativas, tendo em conta a aceitação do público, o seu poder de compra, soluções técnicas, e se é seguro como veículo. Para veículos parcialmente autónomos, ou seja, em que o condutor pode vir a ter de tomar o controlo, e assumindo um cenário limitado, com

um crescimento gradual, obteve-se um valor de 3%. Para o mesmo tipo de veículo mas assumindo um cenário otimista, com um crescimento mais rápido, este obtém o valor de aproximadamente 52%. Para veículos totalmente autônomos, o cenário otimista, toma um valor de 15% (McKinsey 2016);(WorldConference 2019).

Contudo esta penetração irá sempre depender de 4 pilares: a disponibilidade da infra-estrutura, o desenvolvimento e pesquisa da tecnologia VA, a aceitação pública da tecnologia, e por último o enquadramento legal.

Num outro relatório encontrado sobre o setor de transporte para o ano de 2030 na Europa, prevê que 40% da distância percorrida será realizada por veículos autônomos (PWC-Report 2018).

### 2.3 Veículos Autônomos e Partilhados

(Jordan *et al.* 2013) simularam uma frota de VPA para atender à necessidade de transporte numa cidade, e foram desenvolvidos modelos numéricos e analíticos tais como preços de viagem e cálculos de distância. Os modelos foram aplicados a diferentes casos de estudo em contextos diferentes, e concluiu-se que em todos os casos, os VPAs ofereceram uma maior eficiência, menores custos e maior comodidade para os usuários, quando comparados a outros modelos de transporte público e privados. Num caso de estudo em Manhattan, verificou-se que 9000 VPA poderiam substituir mais de 13000 táxis, satisfazendo a mesma procura de transporte com um custo total de 0.31 \$/Km, comparado aos táxis atuais com um valor de 2.5 \$/Km.

Outros autores como (Zhang *et al.* 2015) exploraram o impacto de VPAs em meio urbano, sugerindo que os VPA poderiam eliminar até 90 % do espaço de estacionamento atual.

(Levin *et al.* 2017) estudaram o efeito dos VPAs no congestionamento de tráfego, introduzindo VPAs em modelos de simulação de tráfego. Os resultados mostraram que o serviço VPA, pode reduzir o uso de todos os outros meios de transporte, e aumentar o número de KPV. Contudo eles concluíram que a partilha de veículos, foi eficaz na redução de KPV.

(Martinez *et al.* 2017) apresentaram um estudo para avaliar o impacto de táxis autônomos e partilhados em Lisboa. Simularam cerca de 1.2 milhões de viagens e cenários, sendo os carros privados, táxis e autocarros, substituídos por táxis autônomos e partilhados. Os resultados indicaram uma redução de custo de 55 %, uma maior acessibilidade aos meios de transporte e uma redução das emissões de carbono de quase 40 %. Além disso, também realizaram uma simulação com táxis autônomos partilhados, num cenário onde as opções disponíveis eram caminhar, metro, comboio e VPAs. Para este caso de estudo em Lisboa, concluíram que uma redução de frota de 95% podia ser conseguida. (Martinez *et al.* 2017) e o Fórum Internacional de Transportes estudaram os efeitos da implementação de um sistema VPA de tamanho normal (aproximadamente 4.5 metros de comprimento), além de um sistema de transporte público de alta capacidade. Testes com um modelo baseado em agentes, resultaram numa ocupação média de 2.5 a 3 passageiros.

(Boesch *et al.* 2016) também realizaram um estudo semelhante em Zurique, usando um modelo MatSim para estimar o tamanho da frota necessária de táxis autônomos que seriam necessários. Eles descobriram que se 5 a 10% dos condutores fossem VPAs, com

um tempo de espera aceitável de 5 minutos, a frota sofria uma redução de 75%.

(Fagnant *et al.* 2018) realizaram um estudo em Austin com VPAs e uma taxa de ocupação de 2 e uma taxa de penetração de VPAs de apenas 1.3 %. Isto resultou numa redução de KPV, no entanto com um aumento do tempo de viagem.

Uma maior ocupação do veículo pode reduzir a quantidade de VPAs na estrada, ou seja, reduzir a frota, mas isso não significa necessariamente que a quantidade total de quilómetros percorridos (KPV) seja menor.

### 2.3.1 Penetração no mercado

(Litman 2013) quantificam a dimensão do mercado de partilha de veículos em áreas urbanas, como resultado da automação. De acordo com os seus resultados, os VPAs causarão uma mudança que parte de possuir um veículo privado, para passar a utilizar um veículo partilhado e autónomo, de 1 % por ano. No entanto esta visão enumera problemas pois não especifica se a quota de mercado é expressa em passageiro-quilómetro ou em veículo-quilómetro.

(Moreno *et al.* 2018) fez uma estimativa quantitativa detalhada dos VPAs acerca do potencial e efeito dos VPAs na área de Munique. Numa primeira fase usaram os resultados para calcular a distribuição modal em toda a área, em um futuro onde VAs e VPAs estariam disponíveis. Foi concluído que o carro (convencional, VA, VPA) representaria 51.1 % de todas as viagens, e que o VPA seria responsável por 26,3 % de todas as viagens de carro. No entanto esta experiência não estava aberta à possibilidade de pessoas transitarem entre modos (como bicicleta e transporte público para VPA).

A Comissão Europeia está muito otimista quanto ao potencial da partilha de veículos em combinação com a automação de veículos. Em Maio de 2018, eles apresentaram no programa theMove algumas medidas políticas drásticas e a previsão de biliões de euros em fundos para investigação e desenvolvimento para tornar a mobilidade na Europa mais segura, interligada, autónoma, limpa e acessível. Está entre as suas ambições ter 25 % de todas as viagens nas cidades, cobertas por VPAs até 2030 (CE 2014).

Crow-kpvpv mostra na figura seguinte a evolução na quantidade de carros partilhados por 100 mil habitantes na Holanda.

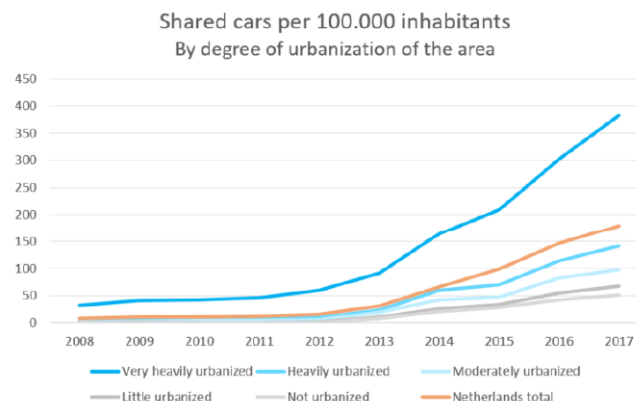


Figura 2.4: Quantidade de carros partilhados por 100 mil habitantes na Holanda, [Fonte: (Kpvcrow 2017)]

## 2.4 Veículos Autônomos Elétricos e Partilhados

(Weiss *et al.* 2017) neste artigo menciona como o desenvolvimento de grandes frotas VPAE, poderiam reduzir o preço dos VE, permitindo alcançar economias maiores na produção de VEs. A figura a seguir ilustra qualitativamente como o custo da mobilidade diminui desde o modelo atual, um veículo com um motor de combustão interna (VCI) com a adoção de níveis crescentes de autonomia (VE/VAE privados), partilha de veículos (carsharing) (VAE com 1 passageiro), e ridesharing (frota possui VAE com 2 passageiros).

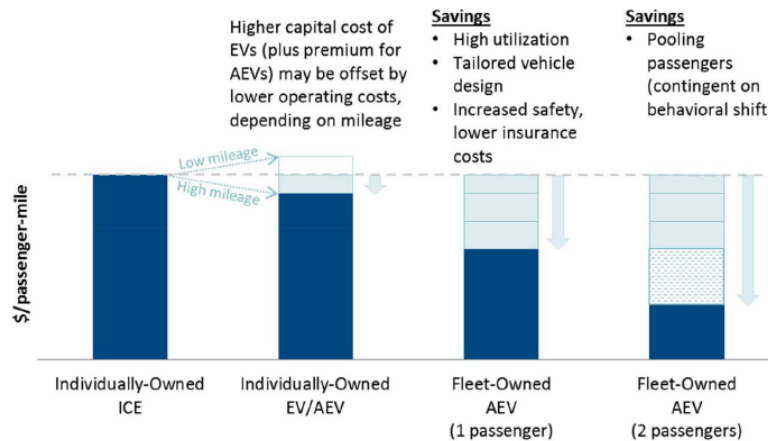


Figura 2.5: Custo associado ao serviço de transporte doméstico diário, [Fonte: Weiss et al. 2017]

Tal como mostra esta figura 2.5, o custo total relativo a um veículo VCI privado (1ª barra) vs VEs (2ª barra), continua a depender da distância anual percorrida. Com a adoção da tecnologia autónoma, e taxas de utilização mais altas, o custo de combustível decorrente da maior utilização, resultará em custos mais baixos (3ª barra). Com VPAEs que transportam passageiros adicionais por trajeto o custo dos serviços de transporte será reduzido ainda mais, fornecidos para a partilha de viagens (4ª barra).

Os VAEs poderiam ser construídos para finalidades específicas, por exemplo, para uso urbano seriam construídos para serem significativamente menores (e talvez com menos assentos). Projetar um VAE para fins específicos, poderia levar a custos totais muito mais baratos, e portanto, reduzir os custos por passageiro e quilómetro percorrido KPV. Os VPAEs exigirão menos carregadores por veículo, devido à redução no tamanho total da frota, e mais carregamentos centrais em menores localizações.

Portanto, comparando um futuro onde um grande número de VEs de propriedade individual são carregados em casa e/ou no trabalho, com um número menor de VPAEs fornecendo o mesmo serviço de transporte, iria exigir talvez substancialmente um menor número de estações de carregamento. Barreiras como a adoção de um VE, custos de manutenção, e outras complicações envolvidas, não iriam ser obtidas ao usar um VPAE.

(Yi *et al.* 2018) desenvolveram um modelo de carregamento mínimo de energia para VEs autónomos, mas privados. O modelo é simulado na maior rede de Chicago incluindo as verdadeiras localizações das estações de carregamento. Cada condutor usou um VE autónomo, o qual deu início ao seu percurso com 20kWh (60-70 milhas de autonomia), e concluíram que 94.3 % conseguiam completar os seus itinerários, não sendo necessário

nenhum carregamento, e 1-2 % não conseguiram encontrar estações de carregamento adequadas a tempo e por isso ficaram presos.

(Farhan *et al.* 2018) realizaram um caso de estudo para ilustrar os benefícios de "ridesharing" comparados aos serviços de "ride-hailing" de VAEs. Os resultados mostraram que ao permitir múltiplos ocupantes melhoravam os benefícios de todo o sistema de 1.34 M \$ US para 1.52 M \$ US. Foi concluído que "ridesharing" é indicado para diminuir o tamanho da frota e o número de estações de carregamento necessárias, para manter a frota operacional. Comparando serviços "ride-hailing" com "ridesharing", o tamanho da frota e o número de estações de carregamento reduziram de 57279 e 1562, para 25368 e 1058 respetivamente. Contudo, os tempos de espera médios são maiores quando permitem uma ocupação quádrupla, comparada a permitir somente ocupação dupla.

(Greenblatt *et al.* 2015b) estimam que os VPAEs poderiam reduzir as emissões GEE em 87-94 % em comparação com os veículos privados atuais nos Estados Unidos. Mesmo considerando que irá haver um aumento substancial da distância percorrida, devido a uma maior conveniência, VPAEs irão continuar a reduzir emissões em comparação com o cenário base, principalmente graças ao facto de que os tamanhos dos veículos podem ser otimizados para cada viagem.

(Iacobucci *et al.* 2018) desenvolveram um modelo de simulação para VPAEs em Tóquio, com o objetivo de avaliar o potencial do sistema para diminuir os custos de carregamento e fornecer reservas à rede elétrica. Os resultados mostraram que os VPAEs podem efetivamente satisfazer os pedidos de viagem com uma frota de cerca de 58 veículos por ano, 1000 viagens por dia, mesmo considerando uma grande área de 1600 quilómetro quadrado. Além disso, concluíram que são 10 vezes mais barato que os táxis tradicionais.

(Chen *et al.* 2016) modelaram um serviço VPAE num espaço de 100 por 100 milhas com 0.25 milhas de espaçamento, e concluiu-se que praticamente todos os passageiros podiam ser entregues, com tempos de resposta pequenos de 2.9 min, com 240 min de carregamento, e um alcance de condução de 80 milhas. A simulação iniciou-se pela criação de percursos de VPAE e algumas estações de carregamento. De seguida criou-se a frota VPAE, da mesma maneira que as estações de carregamento para garantir que nenhum passageiro não esperava mais de 10min. Os resultados sugeriram que o tamanho da frota é muito sensível aos tempos de carga, e à autonomia do veículo, e que a frota com um alcance de condução de 200 milhas, são capazes de reduzir o tamanho da frota em 20 %, enquanto que com um alcance de condução de 80 milhas e carregamentos mais rápidos ( 30 min ao invés de 4h ), reduzem o tamanho da frota em 30 %.

A combinação de grandes distâncias e cargas rápidas reduz o tamanho da frota em 44 % em relação ao caso base. A configuração da sua simulação sugere que o número de estações de carregamento necessárias não variam muito, mas o número de carregadores necessários em cada estação pode ser reduzido em 45.2 % e 85.6 %, para 80 milhas e 200 milhas de alcance respetivamente, realizando carregamentos de 30 min. Também foi concluído que o preço de uma viagem VPAE é de 0.66 \$ US a 0.74 \$ US por pessoa-viagem-milha, o que faria os VPAE economicamente competitivos com outros carros convencionais.

(Bauer *et al.* 2018) desenvolveu um modelo de simulação de VPAEs, que atribuía viagens para o veículo mais próximo. Se não existisse veículos disponíveis, um novo veículo era adicionado para satisfazer a procura. Um processo iterativo foi usado para otimizar a localização das estações de carregamento, e seriam eliminados carregadores a cada iteração se fossem pouco utilizados. O modelo foi testado em Manhattan, com

dados de transporte de viagens de táxi. Resultados concluíram que veículos com alcance de 50 a 90 milhas e 25 carregadores por quilómetro quadrado com uma conexão de 11 kW, podem prestar serviço com um custo de 0.18 \$ US a 0.38 \$ US por quilómetro, cerca de 10 vezes menor do que os táxis normais e menor do que se o serviço fosse prestado por um veículo não elétrico. Por último, foi calculado que os VPAE reduziram as emissões de GEE em 73 %, comparativamente aos táxis atuais com a rede elétrica atual, graças à maior eficiência do veículo.

(Loeb *et al.* 2018) realizaram uma simulação em Austin, Texas, para entender a influência das decisões da tecnologia VPAE. Os resultados concluíram que o número de estações de carregamento necessárias é muito dependente do alcance dos veículos, mas não do tamanho da frota ou dos tempos de carregamento. Os tempos de espera dependem muito do tamanho da frota ou do número de veículos por passageiro. Além disto, diminuir os tempos de carregamento, tem um rápido efeito de diminuição nos tempos de espera.

## 2.5 Modelação macroscópica

(Auld *et al.* 2017) usou um modelo de simulação com o nome de *POLARIS* o qual inclui o comportamento de viagens e fluxo de tráfego para estudar os efeitos de veículos autónomos e conectados na região metropolitana de Chicago. O *POLARIS* permite analisar a interconexão entre as mudanças nos níveis de congestionamento, comportamento de viagem e padrões de atividade. Os resultados mostraram que um aumento de 80% da capacidade provoca um ligeiro aumento de 4% dos QPV. Em contraste, mudanças no custo do tempo de viagem têm um efeito significativo aumentando os QPV em até 59%, enquanto o tempo médio de viagem aumenta de cerca de 20 a 70 minutos.

(Vosooghi *et al.* 2019) realizaram um estudo que avalia o desempenho de várias penetrações e capacidades de VPA, e o impacto da combinação de viagens que prestam serviço a passageiros em Rouen Normandie, na França. De acordo com as simulações o desempenho dos VPAs está fortemente relacionado ao tamanho da frota. Para pequenos tamanhos de frota os tempos de viagem aumentam significativamente e a procura diminui consequentemente. O impacto da combinação de viagens para tamanhos de frota ótimos resultou numa diminuição dos tempos de espera de 25 a 35%, e que ao assumir uma frota de VPAEs resulta num aumento dos QPV sendo necessário recarregar a maior parte dos veículos durante o dia.

Quanto à modelação destes tipos de mobilidade elétrica, autónoma e partilhada no software *VISUM*, apenas 2 artigos foram encontrados. (Hardinghaus *et al.* 2016) desenvolveram e aplicaram um método para estimar as características da procura de carregamentos futuros na cidade de Berlim. Para simular um modelo de tráfego foi usado o software *PTV VISUM* contendo matrizes de procura e redes de tráfego num agrupamento regional de 1224 células de tráfego. De acordo com estas matrizes uma viagem individual tem um comprimento de cerca de 10 quilómetros, com um alcance de 150 quilómetros de carga total, podendo várias viagens ser feitas antes de ser necessário um carregamento. Sete cenários diferentes foram simulados, variando o tamanho da frota de veículos elétricos e partilhados, entre 500 e 1600, e a velocidade dos carregamentos entre tecnologia CA e CC. Os resultados previram para o caso base, que seriam necessárias 1621 horas de carregamento por dia. Se as estações de carregamento exis-

tentes em operação e a adição recomendada fosse implementada, Berlim seria equipado com 543 estações de carregamento em 366 células de tráfego. E outro desenvolvido por (Schroder *et al.* 2014), que avaliaram o fornecimento de veículos elétricos partilhados através da utilização de um modelo microscópico *mobiTopp* e macroscópico *VISUM*. O modelo macroscópico calcula todas as relações destino-origem de um grupo de pessoas, e revela a quantidade total de acessos ao transporte público, bem como o volume de tráfego na rede rodoviária e de transportes públicos. O método de escolha é determinado por muitos fatores, tais como a disponibilidade do carro, as impedâncias entre zonas (tempo de viagem e custo da viagem) e também fatores sociodemográficos. Embora tenha sido desenvolvido para Mannheim, pode ser aplicada a outras cidades e regiões, o que pode ajudar o processo de planeamento e implementação de tal serviço.

Esta dissertação irá abordar a avaliação da navegação de veículos partilhados, elétricos e autónomos, separadamente e combinados, simulados no software *VISUM*, tendo como previsão o ano de 2030. Está focado principalmente em como estes afetam o desempenho no tráfego (todos os veículos presentes em uma dada rede rodoviária). Além disso, serão avaliados os pontos críticos em termos de emissões no cenário base. A rede simulada foi aplicada em diferentes cenários, e avaliada nas 2 rotas mais utilizadas (A1 e N235/IC2), entre Aveiro e Coimbra, na direção sul a norte, para o pico da manhã.



## Capítulo 3

# Metodologia

Neste capítulo estão representadas as etapas que serão realizadas, desde a recolha de dados, até à modelação e obtenção de resultados, como se pode ver no fluxograma apresentado na figura 3.1.

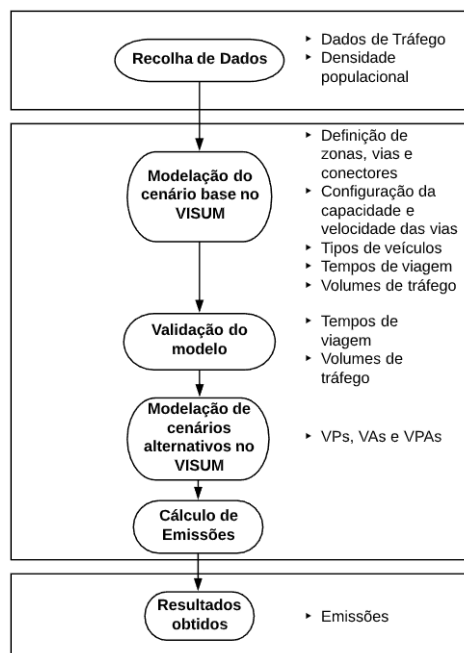


Figura 3.1: Fluxograma

Começa com uma breve descrição do caso de estudo acerca dos limites do modelo de tráfego simulado. A secção 3.2 apresenta uma breve descrição, assim como alguma informação relativa à mobilidade, das cidades de Coimbra e Aveiro, entre as quais toda a rede de tráfego é simulada. Na secção 3.3 está definido como foi realizada a simulação de todos os cenários no software VISUM, assim como informação relativa à previsão da penetração no mercado de vários tipos de mobilidade. Foram realizadas algumas simulações para entender o comportamento e desempenho de veículos com diferentes tipos de mobilidades (VE,VP e VA). A secção 3.4 apresenta todos os indicadores que serão usados para avaliar os efeitos nos diferentes cenários. De seguida, após realizada

a simulação de tráfego, foi feita uma validação do modelo. Por último é especificado de que maneira foi realizada a implementação dos vários cenários alternativos, os quais incluem veículos autónomos, partilhados, elétricos, e uma combinação de ambos, onde posteriormente serão analisados parâmetros, como as suas emissões.

### 3.1 Limites do modelo

O modelo da rede em estudo é entre Aveiro e Coimbra, pelo que serão simulados todos os municípios entre estas 2 cidades (Coimbra, Cantanhede, Anadia, Montemor-o-Velho, Vagos, Penacova, Mira, Mealhada, Ílhavo, Aveiro, Águeda e Oliveira do Bairro) no entanto focando-se em rotas com ligações mais diretas.

Na imagem 3.2 a seguir, estão representadas todas as zonas da rede simulada, mostrando com uma linha a azul escuro os seus limites.

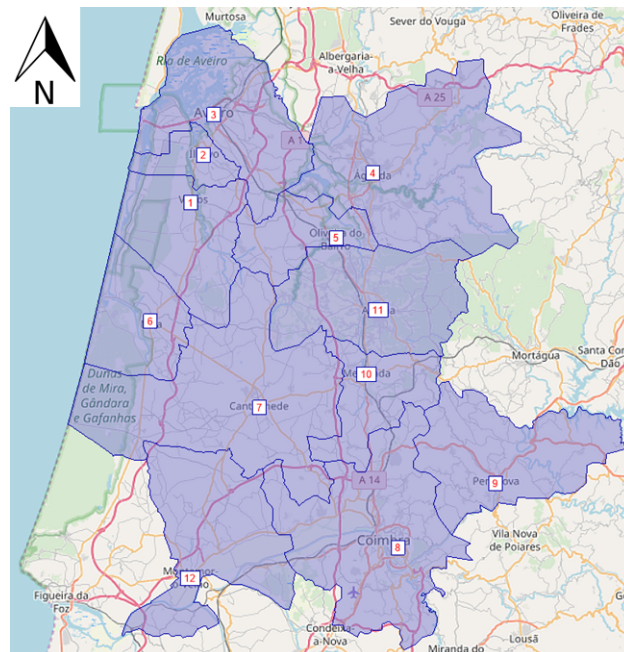


Figura 3.2: Área utilizada no estudo

### 3.2 Caso de estudo: Aveiro - Coimbra

Coimbra tem uma população residente de 105.842 habitantes (2011). A escolha pelo transporte individual motorizado como modo de transporte aumentou 18 % na Região de Coimbra entre 2001 e 2011, sendo que 72 % dos residentes usavam o automóvel como meio de transporte entre casa e trabalho ou escola, em 2011. No distrito de Coimbra o automóvel ultrapassa os 55 % de escolha em todos os municípios. O automóvel na cidade de Coimbra passou de uma proporção de utilização dos transportes motorizados individuais de 57 % em 2001 para 71 % em 2011. Esta procura no lado do transporte individual, poderá estar relacionado com debilidades em torno do sistema de transporte público (PIMP-Coimbra 2016).

A figura 3.3, apresenta os níveis de volume de tráfego dos eixos viários em Coimbra, e como seria de esperar as vias com maiores volumes de tráfego, são as autoestradas.

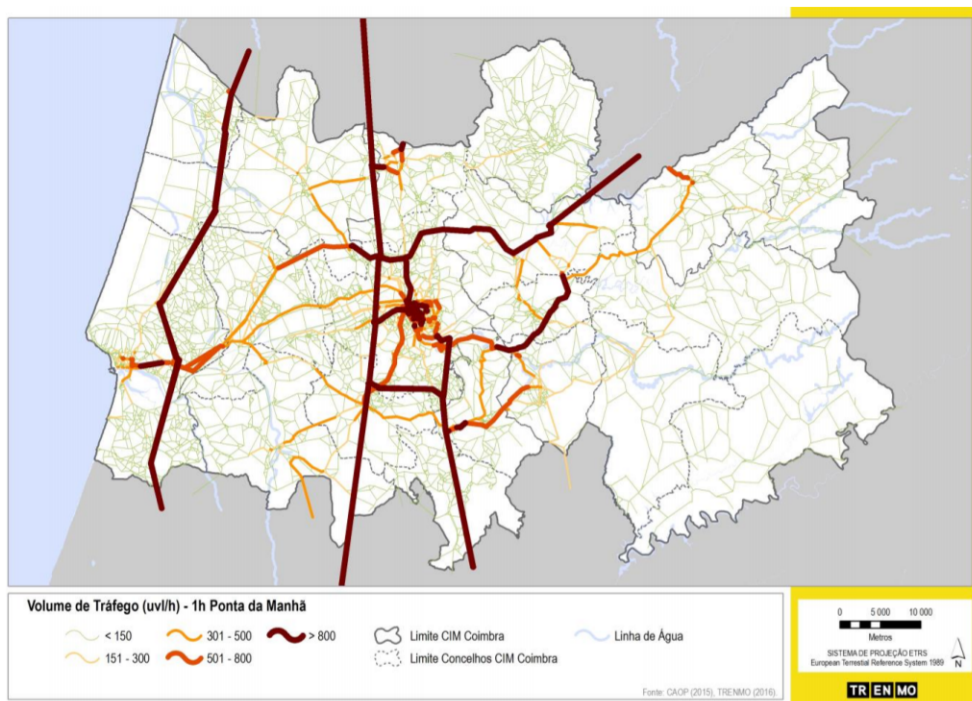


Figura 3.3: Volume de tráfego da Região de Coimbra na hora de ponta da manhã [Fonte: PIMP-Coimbra]

Aveiro é uma cidade na costa oeste portuguesa com uma população residente de 78.455 habitantes (2011). O concelho de Aveiro é o que gera e atrai maior número de viagens (28 %). Os principais fluxos intra-concelhios na Região têm como polo de atração o concelho de Aveiro e têm origem em:

- Ílhavo: cerca de 14.000 viagens por sentido (5 % das viagens em Transporte Colectivo);
- Águeda: cerca de 4.000 viagens por sentido (5 % das viagens em Transporte Colectivo);

Os outros concelhos são Albergaria-a-Velha (14 mil viagens por sentido) e Estarreja (4 mil viagens por sentido), mas não serão abordados.

Em 74 % das viagens realizadas (505 mil viagens) na Região de Aveiro, é utilizado o transporte individual, 16 % das viagens são realizadas a pé, 4 % em bicicleta e 5 % em transporte coletivo, o que traduz uma elevada dependência do automóvel para as deslocações quotidianas na região. (CIM-Aveiro 2014)

Ao analisar os volumes de tráfego rodoviário na hora de ponta da manhã na figura 3.4, é possível identificar as vias em que se verifica uma maior concentração das cargas rodoviárias, sendo estas a IP1/A1 (2400 veículos/hora nos 2 sentidos), a IC1/A29 (2000 veículos/hora), a IP5/A25 (2000 veículos/hora) e por último a EN109 (1600 veículos/hora). Com a introdução de portagens na IC1/A29 e IP5/A25 estima-se que estes valores tenham sofrido um aumento significativo.



Figura 3.4: Volume de tráfego da Região de Aveiro [Fonte: Plano Intermunicipal de Aveiro]

Além disso, é possível verificar que as vias onde se regista maior pressão, são vias de nível hierárquico "intermédio", ou seja, vias onde a capacidade é mais reduzida para os fluxos que sobre elas imperam.

### 3.3 Simulação

O foco desta tese está nas principais vias urbanas, autoestradas e nacionais. O 1º cenário simulado, contém apenas veículos ligeiros convencionais, que pertencem ao transporte privado. Nos cenários alternativos que implementam veículos com mobilidade partilhada e autónoma, o cenário base sofre modificações, como se pode ver mais à frente, na secção 3.8.

O *VISUM* é o software líder mundial para análises de tráfego, previsões e gestão de bases de dados baseadas em GIS (Geographic Information System). Especialistas em transporte utilizam este software para simular redes de transporte, para analisar fluxos de tráfego, planear serviços de transporte público e desenvolver estratégias e soluções avançadas de transporte (Overtoom 2018).

A rede rodoviária usada na simulação entre ambas as cidades, consiste em nós e zonas que estão ligados através de uma rede de estradas (*links*).

Devido ao período temporal limitado para esta dissertação, a análise dos impactos das novas formas de mobilidade focam-se em 2 rotas principais, as quais contêm estradas nacionais e autoestradas principalmente, mas também vias urbanas, que conectam a cidade de Coimbra e Aveiro. Cada *link* é definido através da capacidade de veículos, velocidade, número de vias, e o tipo de transporte que permite. De notar que cada via nas autoestradas tem uma capacidade máxima de 2000 veículos por sentido (AutonomousDriving 2016). Cada zona (município) criado tem um centróide. Este centróide representa o "centro" de cada zona, está localizado no centro de cada município, e contém informações sobre a sua densidade populacional em número de habitantes por quilómetro quadrado, valores estes retirados do *PORDATA*, e a área de cada zona fornecida pelo software *VISUM* após terem sido definidas. Ao multiplicar ambas estas variáveis, foi possível chegar ao resultado do número de habitantes por zona (Population).

Nome	População (nº habitantes)	Área ( $km^2$ )	Atração = Geração
Coimbra	141827	316	83536.10
Aveiro	84013	212	49483.66
Águeda	48425	340	28522.33
Cantanhede	36630	391	21575.07
Anadia	29935	222	17631.72
Montemor-o-Velho	26723	234	15739.85
Ílhavo	24279	46	14300.33
Oliveira do Bairro	24188	92	14246.73
Vagos	22804	165	13431.56
Mealhada	20429	111	12032.68
Penacova	15231	216	8971.06
Mira	12371	123	7286.52

Figura 3.5: Lista de zonas

Os conectores no *VISUM* sendo apenas possíveis entre o centróide de uma zona (centro do município) e um nó, foram criados de maneira a distribuir o número de viagens do município pelas diferentes rotas de toda a rede. Em algumas situações estes conectores foram criados de maneira a que após a simulação, fossem obtidos resultados de volume de tráfego próximos dos valores de volumes de tráfego reais fornecidos pelo *IMT*.

### 3.4 Cenário base

O modelo de simulação no *VISUM*, em termos simples, calcula o número de viagens entre todas as zonas (geração de viagem e distribuição) para diferentes modos de transporte, sobre diferentes "links".

O modelo de 4 etapas, apresentado na figura 3.6, tem como dados de entrada (input), as informações demográficas, como o número de habitantes por zona, representado pela letra *A*. Esta informação é usada para criar o número de viagens. A letra *T* representa a rede rodoviária, que é usada para conectar as diferentes zonas do modelo. Após a distribuição da viagem, as viagens são divididas por diferentes rotas e modos de transporte. Neste caso apenas teremos o carro, no transporte privado.

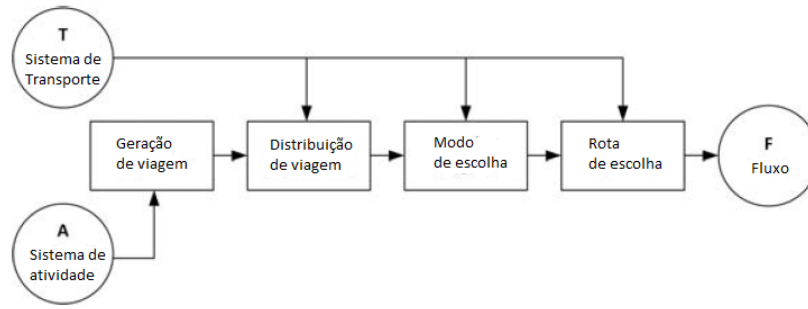


Figura 3.6: Modelo de 4 etapas. Adaptado de (Hamilton 2015)

Apesar das críticas que se colocam a este modelo de 4 etapas, nomeadamente o facto de simular viagens agregadas por intervalo de tempo e não construir uma relação lógica entre as viagens num instante e as do próximo, este modelo continua a ser a melhor ferramenta disponível para Planeamento de Transportes na maioria das áreas urbanas do mundo, e em redes de maior dimensão, quando a simulação microscópica se revela impraticável devido aos recursos necessários, quer para o desenho do modelo, quer a nível da simulação computacional (Ferreira 2012).

O 1º procedimento passou por gerar o número de viagens para o modo de transporte carro. A partir do PIMP-Coimbra foi obtido que a taxa de ocupação destes veículos, para o transporte individual, era igual a 1.41 pessoas e que 63% de todas as viagens era realizada por carro. Sabendo estes valores, e para melhor ajustar a simulação ao caso real, a rede de tráfego foi simulada admitindo um valor de 1.41 pessoas por carro e uma taxa de ocupação de 60%. Depois de definidos estes valores, foram simuladas todas as viagens, para a hora de ponta da manhã, admitindo que 0.1 viagens por habitante são realizadas, sendo que 60% do total destas viagens, são realizadas por um carro convencional. Para obter apenas o total de todas as viagens de origem, a formula usada foi a seguinte:

$$Total \quad viagens = [População] \times (0.1/2) \times 0.60 \quad (3.1)$$

Neste modelo tanto a atração (Attraction) como a produção (Production) em cada zona é igual, pois a atração corresponde à distribuição da produção, como mostra a figura 3.5.

De seguida considerando na mesma o veículo ligeiro convencional como transporte privado, o software criou uma matriz 12 por 12, Origem-Destino, a que se dá o nome de *skim matrix*, que apresenta valores acerca do tempo de viagem entre cada zona. A tabela A.2 apresenta os tempos de viagem entre todos os municípios. De referir que esta metodologia foi a mesma utilizada nos planos intermunicipais de Coimbra e Aveiro (PIMP-Coimbra 2016);(CIM-Aveiro 2014).

Após estes dois procedimentos, seguiu-se para o terceiro, que passa por criar uma matriz com todo o tráfego de origem para os carros [Distribution-All-POP].

A distribuição do número total de viagens pode ser feita através do cálculo com uma função *Logit*. Este cálculo compara o custo generalizado de uma alternativa com todas as outras alternativas. De frisar que a relação entre as probabilidades de escolher duas alternativas, é independente do conjunto de opções. Noutras palavras, se A for preferido ao invés de B, no conjunto A,B, introduzindo uma opção C, expandindo o conjunto para



A,B,C, B não será preferível a A. Não há correlação em fatores não observados, acima das alternativas (Anagnostopoulos 2012).

Choice model for AT\_POP

Options Function graph

Function type

- ☒ Logit:  $f(U) = e^{(c U)}$
- ☐ Kirchhoff:  $f(U) = U^c$
- ☐ BoxCox:  $f(U) = e^{[c (U^b - 1) / b]}$
- ☐ Combined:  $f(U) = a U^b e^{(c U)}$
- ☐ TModel:  $f(U) = 1 / (U^b + c U^a)$

Parameters

a: 1

b: 1

c: -0.03

Direction of the distribution

- ☒ Constrained production
- ☐ Constrained attraction

☒ doubly-constrained: Balancing by multi-procedure

Initial matrix balancing according to ...

- ☒ Production total
- ☐ Attraction total
- ☐ Mean of both totals
- ☐ Minimum of both sums
- ☐ Maximum of both sums

Multi-parameters

Maximum number of iterations: 10

Quality factor: 3

Reset OK Cancel

Figura 3.7: Função Logit

Para este cálculo foi tido como referência a matriz com os tempos de viagem calculada anteriormente, e considerada uma função do tipo *Logit* balanceada por multi-procedimento, e com  $c$  a tomar o valor de -0.03 para obter valores equilibrados em ambas as direções, tal como se pode observar na figura 3.7 (VISUMFundamentals ).

Com todos estes dados e aqueles que o *OpenStreetMap* já fornece, foi possível determinar o número de viagens entre cada município (OpenStreetMap ).

Na figura 3.8 está representada um mapa da rede usado no software de simulação, sobreposta em um mapa retirado do *OpenStreetMap*. É possível observar todas as vias de tráfego, assim como a distribuição do tamanho das zonas. A amarelo estão representadas as estradas nacionais e a vermelho e amarelo as autoestradas. Por último a azul, estão representados todos os municípios usados na simulação. Alguns dos pontos que se vêem nas vias, correspondem a nós que serviram para ligar alguns dos conectores.

O quarto e último procedimento passa por utilizar um modelo que distribui o número de viagens pelos diferentes *links*. O algoritmo utilizado foi o *Equilibrium Luce* criado por Guido Gentile, que alcança uma velocidade de convergência muito alta enquanto atribui o fluxo de cada par OD em vários trajetos de uma só vez. Além disto é o mais bem aceite pela comunidade (Gentile *et al.* 2009). O número máximo de iterações tomou um valor de 100, e um *maximum gap* de  $1e-05$ .

Os resultados obtidos na figura 3.9 indicam o volume de tráfego de veículos na hora de ponta, em cada via. Para melhor compreender este volume, utilizou-se uma classificação gráfica com cores, desde uma cor fria (verde claro), a uma cor quente (vermelho), assim como o seu valor associado. Esta escala de valores de volumes de tráfego, associado a uma cor pode ser vista mais tarde na análise dos pontos críticos da rede, no capítulo 4.2.

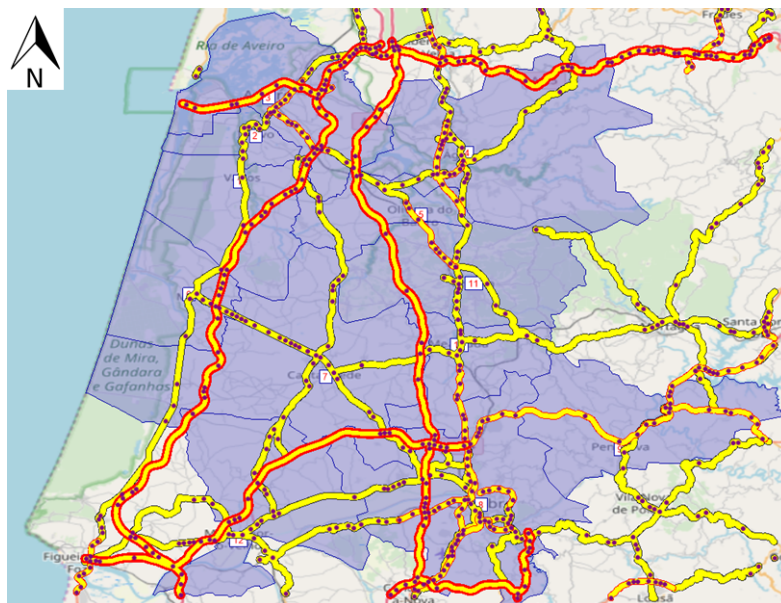


Figura 3.8: Mapa com as vias de tráfego usadas na simulação

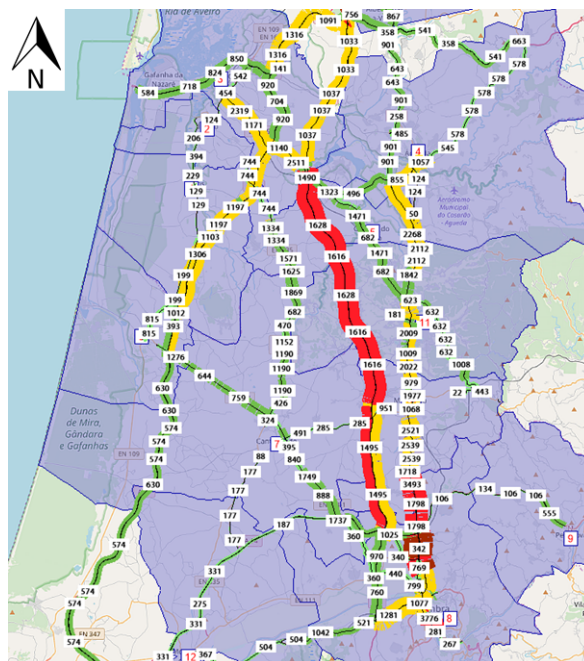


Figura 3.9: Mapa com os volumes de tráfego obtidos na simulação para cenário base

Para aproximar o máximo possível estes valores obtidos na simulação, com o caso real, e assim saber se são viáveis, fez-se uma comparação destes, com 10% dos valores de Março de 2017 registados pelo IMT (IMT2017).

Na tabela A.4 que será mostrada mais adiante na parte da validação, são mostrados os valores em vários pontos de 4 autoestradas.



### 3.5 Cenários alternativos

Após o cenário base estar simulado, simularam-se vários cenários alternativos para o ano de 2030, pois é um ano que já contém algumas previsões quanto à mobilidade, e o ano onde a circulação de veículos de combustão interna em algumas zonas, principalmente grandes cidades, não será permitida (Guardian 2019).

Foram criados diferentes cenários, abordando a mobilidade partilhada, elétrica e autónoma, em separado, e combinada entre ela. O efeito de uma mobilidade partilhada, já existe há algum tempo por todo o mundo, mas existem previsões para que aumente, pois o mundo tem evoluído para um ponto onde o veículo vai deixar de ser considerado um bem material e de conforto, para passar a ser um objeto que apenas serve de transporte às pessoas (Rodrigue *et al.* 2013).

#### 3.5.1 Penetração de VPs no mercado

Com base no que foi encontrado na literatura sobre a crescente popularidade da partilha de veículo, traduzido do termo em inglês *ridesharing*, apresentado na secção 2, não se sabe ao certo como a penetração de VPAs irá afetar a distância total conduzida, pois diversos fatores estão em causa. Portanto, foram simulados cenários onde havia uma maior penetração da mobilidade partilhada, simulando assim um menor número de viagens correspondente, devido ao aumento da taxa de pessoas por veículo.

(PWC-Report 2018) realizou um cenário de estudo, com resultados que culminaram em mais de 1/3 (cerca de 33%) dos quilómetros percorridos, serem realizados de forma partilhada. É ainda referido por Jens Hörning que os veículos privados daqui a poucos anos, deixarão de ser um produto, para se tornarem um serviço disponível para todos.

Ainda numa empresa de investigação que tem o nome de Gartner Inc, prevê que 20% dos veículos nos centros urbanos sejam dedicados ao uso compartilhado no ano 2025 (Gartner 2018). Visto que este trabalho está a ser analisado para o ano de 2030, assumiu-se um valor de 22.5% de penetração.

Num outro artigo escrito em 2017, especialistas prevêem que até 2030, tanto a Malásia como a Austrália irão ter uma aceitação significativa nos programas de partilha de carros. Os valores apontam para 11 a 25% dos condutores malaios e 26 a 50% dos condutores australianos entrarem nestes programas (Zhou *et al.* 2017).

Assim sendo, foram simulados 3 cenários, com um valor de penetração de 22.5, 33 e 50 %. Dito de outra forma, com 1.6, 2.1 e 2.8 pessoas por veículo, tal como está expresso na tabela 3.1. É importante notar que para esta pesquisa optou-se por considerar apenas a percentagem de condutores que mudam do veículo privado para passar a usar um veículo partilhado, e não dos que mudam de transporte público para usar um veículo partilhado. O objetivo final destes cenários é avaliar as consequências do ponto de vista macroscópico, assim como realizar uma análise de sensibilidade do impacto relativo do aumento do número de ocupantes por veículo, sabendo de antemão que existe um elevado nível de incerteza sobre a razoabilidade destes cenários.

#### 3.5.2 Penetração de VEs no mercado

Nesta secção encontra-se informação encontrada acerca da penetração no mercado apenas de veículos elétricos (VEs).

A J.P Morgan, uma empresa líder global em serviços financeiros, oferecendo soluções para corporações, governos e instituições importantes, realizou uma estimativa para a penetração da mobilidade elétrica, contendo VBEs, PHEVs, VCIs e híbridos, para os anos 2020, 2025 e 2030. Ao analisar esta estimativa para o ano de 2030, os VBEs tomam um valor de 18% (JPMorgan 2018).

(Wu *et al.* 2012) construíram quatro cenários descritivos da penetração de veículos elétricos, a fim de determinar seus impactos em termos de consumo energético e emissões de GEE. Cada um dos cenários é aplicado a três regiões chinesas que apresentam profundas diferenças entre si no que se refere ao perfil dos seus setores elétricos. Apesar destes cenários considerarem a entrada de VEHs e PHEVs, apenas se analisou a penetração de VEs para 2030. O cenário 1 representa uma situação em que a penetração de veículos elétricos é determinada unicamente pelas forças do mercado, e os VEs atingem um valor de 0.1% em 2030. O cenário 4 prevê uma situação de maiores incentivos a estas tecnologias, fazendo com que os VEs atinjam um valor de 20%. Por último, o cenário 2 que representa uma situação onde se assume uma maior limitação aos avanços nas baterias e nas tecnologias de recarga, os VEs obtêm um valor de 2%.

PWC-Slovakia concluiu que 55% dos veículos serão elétricos em 2030, se ocorrerem avanços no desenvolvimento de carros autónomos e na eletrificação de sistemas de acionamento.

Prevê-se que no Reino Unido, depois do sucessivo progresso na tecnologia elétrica, os VBEs e PHEVs irão corresponder a 69% do número total de vendas de carros (International 2019).

Assim, escolheu-se utilizar valores de penetração de 2%, 18% e 20% para os VEs.

### 3.5.3 Penetração de VAs no mercado

Através de artigos científicos encontrados, tal como referido na secção 2 (Revisão Bibliográfica), verificou-se que veículos autónomos de nível 4 e 5, estarão nas estradas num futuro próximo, obtendo valores entre 1% e 52%. Assumindo valores razoáveis e intermédios para as simulações, usou-se um valor de 25% e 35% de VAs em diferentes cenários.

### 3.5.4 Suposições de penetração de mobilidade combinada

Quanto aos veículos partilhados e autónomos (VPAs), também foram encontrados artigos na revisão bibliográfica acerca da sua crescente popularidade, assim como estimativas para um futuro próximo, pois existe uma grande correlação entre a tecnologia autónoma e a partilha de viagens, assim como objetivos políticos ambiciosos por parte da Comissão Europeia (Parlamento-Europeu 2019). Tal como referido anteriormente no capítulo 2, espera-se que a penetração de VPAs estará entre 3 e 50% dos condutores que utilizam um carro pessoal. É importante referir que são valores de condutores que deixam de usar o seu carro pessoal, para usar um carro partilhado, e não para quem deixa de usar um transporte público, para usar um veículo autónomo e partilhado (Overtoom 2018).

Assim os cenários com VPAs, VPEs, VEAs e VPAEs foram simulados assumindo uma penetração de 25% VAs, 33% VPs e 18% VEs. Estes valores correspondem a uma % média de penetração no mercado de VAs, VPs e VEs para o ano de 2030 como visto anteriormente.

Na tabela 3.1 são apresentados os valores com a penetração de cada tipo de mobilidade para cada um dos 13 cenários. Os formatos dos nomes de cada cenário estão estruturados, de forma a demonstrar estes valores com a percentagem de veículos que são partilhados, elétricos e autónomos, da maneira que se segue: (% penetração VPs/% penetração VEs/% penetração VAs).

Cenários	VP (% de veículos)	VE (% de veículos)	VA (% de veículos)	Ocupação (pessoas por veículo)
1. base	0	0	0	1.41
2. 22.5/0/0	22.5	0	0	1.6
3. 33/0/0	33	0	0	2.1
4. 50/0/0	50	0	0	2.8
5. 0/0/25	0	0	25	1.41
6. 0/0/35	0	0	35	1.41
7. 0/2/0	0	2	0	1.41
8. 0/18/0	0	18	0	1.41
9. 0/20/0	0	20	0	1.41
10. 33/0/35	33	0	35	2.1
11. 0/18/35	0	18	35	1.41
12. 33/18/0	33	18	0	2.1
13. 33/18/35	33	18	35	2.1

Tabela 3.1: Lista de cenários

### 3.6 Indicadores

Alguns indicadores foram usados para realizar uma comparação entre todos os cenários, avaliar os efeitos, e assim obter conclusões sobre o desempenho do sistema.

Nesta secção, 3 indicadores são apresentados com uma breve descrição da sua função, que servem tanto de validação, como para analisar resultados.

O tempo de viagem dado pela *skim matrix* representa o tempo que ocorre na transferência entre as várias zonas. A distância de cada *link* em conjunto com a sua velocidade permite chegar aos tempos de viagem. Estes tempos de viagem foram apenas calculados para a fase validação.

Os volumes de tráfego informam sobre o número de veículos, presentes em cada *link*, numa hora (a hora de ponta). Este volume do número de veículos foi um dos resultados obtidos após realizada a simulação, o qual foi necessário na fase de validação, ser ajustado em diversos parâmetros tais como a velocidade limite dos veículos e a capacidade da via a fim de poder atingir valores próximos dos valores fornecidos pelo *IMT*.

O consumo de energia é importante como mencionado anteriormente e por isso deve ser quantificado. Como os gases libertados pelos tubos de escape pelos carros no ano de 2030 serão provavelmente muito diferentes, as emissões nesta dissertação são usadas para avaliar o desempenho energético nos vários cenários. Emissões podem ser estimadas usando o software COPERT (Emisia SA, 2018) ou PEV (Potência Específica de Veículo) (US EPA., 2002).

Aqui irá-se usar uma metodologia mais direta e simplificada, que estima as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> para dois veículos convencionais (Macedo *et al.* 2019). As equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 foram estimadas através da recolha de dados a cada segundo, das cara-

terísticas da rota, e a caracterização da dinâmica do veículo, que posteriormente foi inserida na metodologia PEV. O PEV é expresso numa equação em função da velocidade, aceleração, desaceleração e inclinação. Através da relação entre todas estas variáveis e emissões, um modelo de regressão foi desenvolvido no software *Rapid Miner*, que previu os diferentes valores de emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> associados a uma velocidade instantânea.

As emissões de CO<sub>2</sub> em (g/km) para um veículo de passageiros típico de Portugal a diesel, onde  $s$  corresponde à velocidade em (km/h) é dado pelas seguintes fórmulas:

$$CO_2 = \begin{cases} 0.072s^2 - 7.530s + 360.424, & s \leq 50 \text{ km/h} \\ 0.016s^2 - 2.382s + 232.506, & 50 < s \leq 90 \text{ km/h} \\ -0.013s^2 + 4.063s - 118.60, & s > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3.2)$$

enquanto as emissões de NO<sub>x</sub> em (g/km) podem ser obtidas usando as seguintes:

$$NO_x = \begin{cases} 0.0003s^2 - 0.0281s + 1.3511, & s \leq 50 \text{ km/h} \\ 0.0001s^2 - 0.0142s + 1.0232, & 50 < s \leq 90 \text{ km/h} \\ -0.0001s^2 + 0.0334s - 1.5687, & s > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3.3)$$

Para as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em (g/km) de um veículo de passageiros típico de Portugal, mas a gasolina, é dado pelas seguintes fórmulas:

$$CO_2 = \begin{cases} 0.167s^2 - 14.469s + 477.342, & s \leq 50 \text{ km/h} \\ 0.0165s^2 - 2.362s + 224.54, & 50 < s \leq 90 \text{ km/h} \\ -0.010s^2 + 3.173s - 62.782, & s > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$NO_x = \begin{cases} -3.419E - 07s^4 + 3.433E - 05s^3 - 0.001s^2 + 0.015s + 0.191, & s \leq 50 \text{ km/h} \\ 0.0013s + 0.132, & 50 < s \leq 90 \text{ km/h} \\ -3.664E - 05s^2 + 0.011s - 0.473, & s > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (3.5)$$

O valor das emissões para os veículos convencionais foi calculado assumindo que 50% são a gasolina e os outros 50% a diesel (EMISIA 2019).

Para filtrar as diferenças nas emissões que ocorrem apenas por um veículo (g/km.veh) ou, uma quantidade de vários veículos numa determinada via (g/link.h), é feita a multiplicação das emissões de um veículo pela distância do *link* e pelo número de veículos nesse *link*.

Quanto aos veículos elétricos, não há emissão local, pois o seu movimento é desencadeado pelo motor elétrico. Contudo é relevante o cálculo das emissões produzido na produção de energia elétrica, que é necessário para o carregamento da bateria do veículo. Para isso, primeiramente foi feito o cálculo do consumo, através da equação de um gráfico que relaciona o consumo em (Wh/km) com a velocidade em (km/h), como se pode observar na figura 3.10. Esta equação foi obtida através da interpolação de todos os pontos que estavam contidos na imagem do gráfico, consumo de energia vs velocidade, no artigo (Badin *et al.* 2013). Ainda de referir que esta curva é uma aproximação à presente no artigo, pois todos os pontos inseridos no excel, foram obtidos através do software *WebPlotDigitizer* presente na internet (WebPlotDigitizer 2019).

Após obter o consumo em (kWh/km), e ter sido feita alguma pesquisa, foram encontradas 2 rotulagens de energia elétrica da EDP e da GALP, para o ano de 2018, que fornecem o valor de emissão de CO<sub>2</sub> em (g/kWh) imputáveis à produção de eletricidade,

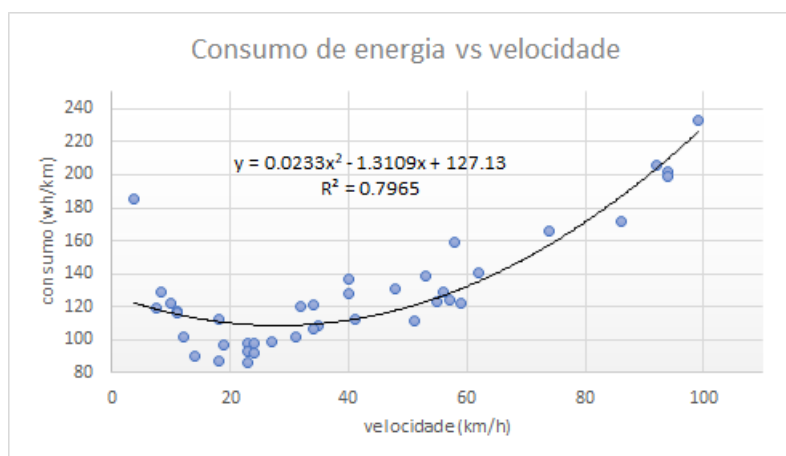


Figura 3.10: Curva do Consumo de energia em função da velocidade

e considerando um mix energético, com um contributo de 54.9% de energias renováveis na GALP e 70.3% na EDP. Os valores são de 268.78 g/kWh e 167 g/kWh respetivamente (GALP 2017);(EDP 2018).

Contudo, informação presente no portal da Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE), dispõe de dados sobre o mix energético, sobre a % de cada fonte de energia (2019), bem como o seu fator de emissão de CO<sub>2</sub> em (g/kWh) associado (2018). Na tabela 3.2 estão representados estes valores, que resultaram num valor de emissão de 277.454 (g/kWh) (ERSE 2019).

Mix base do sistema	Produção base do sistema (%)	FE CO <sub>2</sub> (g/kWh)
Eólica	21.041%	0
Hídrica	22.139%	0
Cog. Renovável	3.433%	0
Outras renováveis	7.146%	0
RSU	0.822%	780
Cóg. Fóssil	7.523%	327
Gás Natural	17.546%	370
Carvão	20.350%	892

Tabela 3.2: Dados da rede elétrica nacional [Fonte:ERSE]

Neste trabalho os valores utilizados para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> foram o de 277.454 (g/kWh) dado pela ERSE, e o valor de 0.2 (g/kWh) dado pela EDP no relatório de sustentabilidade, do ano 2017, referente a Portugal (EDP 2017).

### 3.7 Validação

A validação são essenciais para alcançar resultados mais precisos, replicar de forma fiel as características do domínio de estudo, e assim os seus resultados poderem ser considerados adequados.

Para modelos que usam um cenário para o ano atual, a sua validação pode ser feita comparando os resultados obtidos com os dados em campo. Contudo, neste caso, os

cenários simulados usam uma situação hipotética para o ano de 2030.

A validação destes modelos consistiu em 2 passos: no primeiro passo, os volumes de tráfego fornecidos pelo *IMT* que registam o tráfego médio diário mensal por autoestrada e por troço, foram recolhidos para a A1, A14, A17 e A25, para Março de 2017 (IMT2017). Posteriormente, para analisar a hora de ponta da manhã, considerou-se 10% dos valores fornecidos pelo *IMT*, que de seguida foram comparados com os valores retirados da simulação do modelo *VISUM* (WSDOT 2011).

Os volumes de tráfego do modelo base simulado foram obtidos através da análise de cada troço da autoestrada. Para isso definiu-se no *VISUM* que cada *link* apresentasse o volume de veículos para o transporte privado, o (Volume PrT - veh), tal como mostra a figura 3.11:

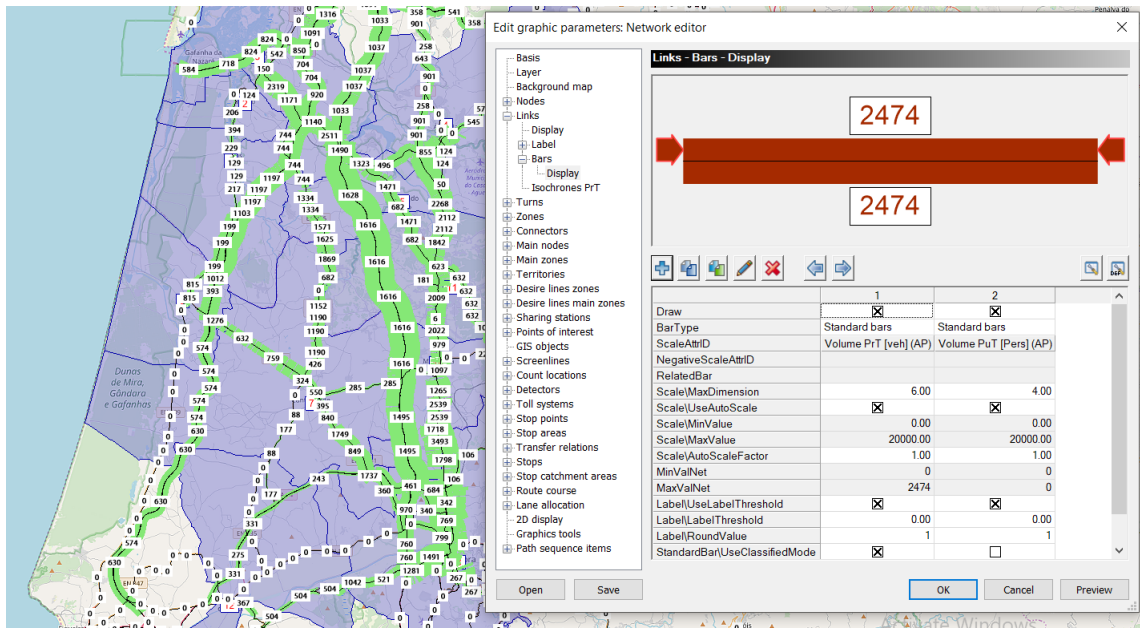


Figura 3.11: Visualização do volume de veículos para cada *link*

Para analisar as diferenças entre a monitorização e os resultados do modelo, calculou-se a percentagem do erro quadrado sistemático médio, método recomendado pela (FHWA 2010) e utilizado por Khattak e Wang em estudo semelhante, e (Bandeira 2009) para estudar o impacto de padrões de uso do solo e mobilidade na qualidade do ar.

A fórmula é dada pela expressão:

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{(\#O - 1)}}}{\frac{\sum O_i}{\#O}} 100 \quad (3.6)$$

Onde:

- P: valores simulados (*VISUM*)
- O: valores observados (*IMT*)

Depois de analisar os 23 *links*, nos troços das 4 autoestradas, apresentados na tabela A.4, verificou-se em alguns troços da A17 e A25 valores simulados com uma discrepância

maior face aos observados, devido à dificuldade de conseguir distribuir todo o número de viagens pelas estradas na rede.

Após efetuar todos os cálculos, obteve-se um erro aproximadamente de 5.26%, inferior a 10%, validando assim os volumes de tráfego.

Posteriormente foi realizada a validação dos tempos de viagem entre as 12 zonas, comparando os valores recolhidos da *skim matrix* do modelo *VISUM*, com o menor tempo de tráfego dado pelo Google Maps para a hora de ponta da manhã (13h) no dia 17/07/2019, entre cada município (GoogleRoutes 2017).

O critério de validação consistiu no cálculo de Park and Qi, que propuseram uma equação para validação dos modelos de simulação no VISSIM. Esta equação tem sido amplamente utilizada devido à sua fácil implementação e bom desempenho na validação e otimização.

A formula é dada pela expressão:

$$FV = \frac{|TT_{field} - TT_{sim}|}{TT_{field}} \quad (3.7)$$

Onde:

- $TT_{field}$  = tempo de tráfego observado (minutos)
- $TT_{sim}$  = tempo de tráfego simulado (minutos)

Na tabela A.3 apresentam-se os resultados de validação dos tempos de viagem. Os erros entre cada zona variam entre 2% e 35%, com excepção da zona de Cantanhede, que apresenta valores com uma diferença maior entre os tempos simulados e observados.

Segundo este critério, os tempos de viagem obtidos de um modelo não validado teriam um erro de 21% (Park *et al.* 2005). Contudo, estes resultados da tabela revelaram um erro de 22.6%, o qual pode ser justificado pela representatividade dos diversos *links* e conectores criados por toda a rede de estudo. Apesar do erro ser ligeiramente superior, considerou-se este valor como aceitável, tendo em consideração os seguintes factores:

1. o objectivo desta dissertação é realizar uma comparação relativa dos impactos dos vários cenários e não uma determinação absoluta;
2. o tempo limitado para o desenvolvimento da dissertação;
3. o facto da simulação ser referente a um horizonte temporal futuro, com elevados níveis de incerteza sobre a frota;

### 3.8 Especificação de Rotas e Cenários

Todos os cenários criados foram analisados em 2 rotas escolhidas entre Coimbra e Aveiro. No entanto, apenas foram analisadas as emissões no sentido de Coimbra a Aveiro.

A primeira rota escolhida é a mais rápida, e também a mais usada, pois atravessa a A1, assim como a A31 e N235. Na figura A.1a) e 3.12 é possível observar a rota no Google Maps, e no VISUM respetivamente

Esta rota contém um total de 422 *links*, com uma extensão total de 124.7 quilómetros nos dois sentidos. É composta por vias urbanas, nacionais e autoestradas, contendo num sentido 1,2 e 3 vias.

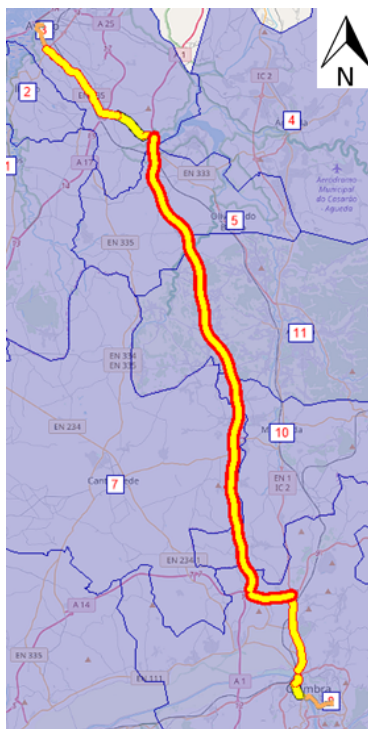


Figura 3.12: Rota 1 - A1 (Fonte: VISUM)

A segunda rota escolhida é também das mais usadas, pois ao evitar autoestradas torna-se mais económica, apesar do acréscimo no tempo de viagem. Esta rota atravessa a N235 e a IC2. Na figura A.1b) e 3.13 é possível observar a rota no Google Maps, e no VISUM respetivamente.

Esta rota contém um total de 926 *links*, com uma extensão total de 130.4 quilómetros nos dois sentidos. É composta por vias urbanas e nacionais e contém uma ou duas vias por sentido.

O cenário base diz respeito às condições atuais da rede no período de hora de ponta da manhã, no qual o modelo foi validado através dos volumes de tráfego e tempos de viagem. Neste cenário a rede viária consiste em apenas veículos convencionais. Como referido anteriormente, foram geradas viagens para o transporte individual assumindo 0.1 viagens por habitante com uma taxa de uso de carro de 60%. Como referido no Plano de Mobilidade de Coimbra a taxa de ocupação é de 1.42 pessoas por veículo com uma taxa de utilização de carro de 63% (PIMP-Coimbra 2016).

Posteriormente, foram implementados 13 cenários alternativos com o objetivo de estudar o impacto e os efeitos no funcionamento da rede dos VPs, VAs, VEs, e combinações com ambos. Na tabela 3.1 apresentada anteriormente podemos ver a penetração de cada mobilidade em cada um dos cenários e um último cenário com a penetração de VPAEs no cenário base.



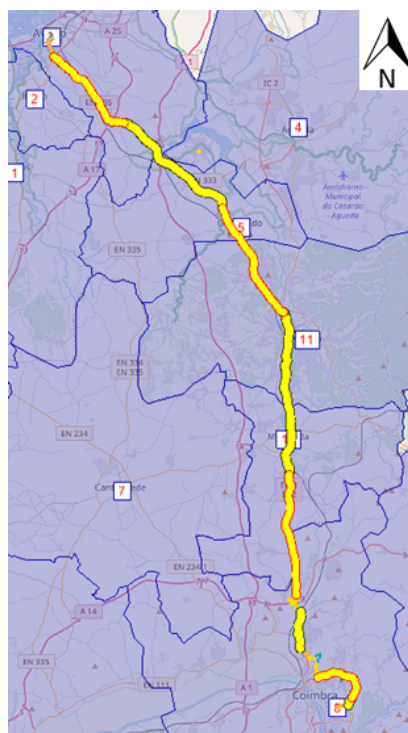


Figura 3.13: Rota 2 - N235 e IC2 (Fonte: VISUM)

A mobilidade partilhada foi modelada no *VISUM*, aumentando o número de pessoas por veículo, e portanto reduzindo o número de viagens por habitante. Para uma taxa de penetração de 22.5%, 30% e 50%, 0.0875, 0.067 e 0.05 viagens por habitante foram simuladas respetivamente, considerando na mesma os 60% de taxa de utilização.

A mobilidade autónoma foi modelada no *VISUM*, com base num artigo desenvolvido por Friedrich em 2016, que mostra como a capacidade de uma infra-estrutura utilizada por VAs difere de uma infra-estrutura utilizada por veículos convencionais conduzidos por humanos (AutonomousDriving 2016). A capacidade de uma via de tráfego é determinada pelo número de veículos que passam nessa secção por unidade de tempo. Para um tráfego misto, e assumindo um intervalo de tempo para o veículo precedente ( $T_h$ ) de 1.15 s, um intervalo de tempo entre veículos autónomos ( $T_a$ ) de 0.5, e um  $L_{pkw}$  (comprimento médio do veículo de 4.5m e uma distância de segurança mínima do veículo da frente de 3m) igual a 7.5m. A partir do gráfico na figura ?? é claro que a capacidade aumenta mais lentamente com penetrações baixas de VAs, notando-se a partir dos 50% um maior aumento. O fator de aumento da capacidade/h para os 25% e 35%, é de 1.1173 e 1.1780 respetivamente. Este valores de ambos os fatores foram obtidos dividindo o valor de  $C_m$  (veh/h) correspondente a 25% e 35%, pelo valor correspondente a 0%. Isto resultou nas divisões:

- 2705/2421 para 25%
- 2852/2421 para 35%

De seguida este fator foi multiplicado pela capacidade de todos os *links* em ambas as rotas, aumentando assim a capacidade de todas as vias.

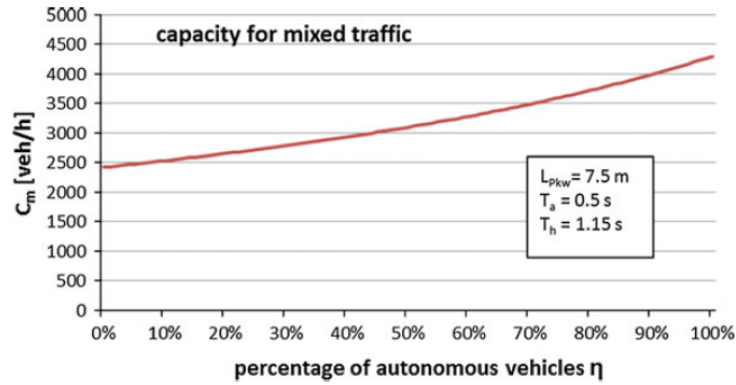


Figura 3.14: Capacidade de uma via em proporção à penetração de veículos autónomos [Fonte:AutonomousDriving 2016]

Não sendo possível simular as diferenças e dinâmicas operacionais dos veículos elétricos num modelo macroscópico como o VISUM, os cenários que o contêm envolvem o cálculo do seu consumo e emissões, assumindo a sua percentagem de penetração.

De referir que os tempos de viagem são os mesmos do cenário base para qualquer outro cenário.

## Capítulo 4

# Apresentação e Discussão de Resultados

Após a realização das simulações de todos os cenários descritos acima, os dados puderam ser analisados e comparados. Nesta secção são apresentados os resultados ao nível de desempenho de tráfego e emissões. O impacto foi analisado para as rotas 1 e 2, salientando também um troço ou outro em particular. Todos os resultados absolutos relativos às emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> podem ser encontrados nas tabelas, nos anexos A.5 e A.6, que mostra as células com um leque de cores, desde o verde que corresponde às células com os valores mais baixos, até ao vermelho que corresponde às células com valores mais altos, podendo assim ter uma melhor visualização de quais os cenários mais significativos.

O cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em gramas corresponde ao valor emitido em cada *link*. Este valor obtém-se multiplicando-se o fator de emissão em gramas/quilómetro para a respectiva velocidade atual em cada *link* pela distância do link. A soma dos valores em gramas por veículo para todos os links representa o valor de emissão total para cada viagem por veículo. Ao multiplicar este valor pelo número de veículos no *link*, e realizar o seu somatório obtém-se as emissões totais do sistema, para a hora de ponta da manhã em gramas/link para o período de 1 hora de simulação.

### 4.1 Comparação das emissões entre cenários

Nesta secção são apresentados os resultados ao nível das emissões entre o cenário base, e os restantes cenários alternativos. Assim como também a sua comparação entre ambas as 2 rotas analisadas.

As emissões do sistema para cada cenário são apresentadas através das curvas dos gráficos que relacionam a velocidade dos veículos em função do volume/capacidade do mesmo *link*, e as emissões do veículo para cada cenário, através das curvas dos gráficos que apresentam os níveis de emissões em gramas por quilómetro em função da velocidade, para cada *link*. Como será visto, estas curvas têm um maior nível de emissões para pequenas e grandes velocidades, o que mostra assim a sua semelhança com os polinómios usados para calcular as emissões para os veículos convencionais, partilhados e autónomos, a gasolina e diesel, assim como com a curva do gráfico 3.10 que relaciona o consumo de energia de um veículo elétrico em função da velocidade.

Apesar destes cálculos de emissões serem para dois veículo representativos do parque automóvel nacional verifica-se uma grande similaridade destas curvas com as obtidas nos gráficos 4.1a) e 4.1b). Os quais mostram que independentemente do Padrão Europeu de Emissões (*Euro* do veículo), ou seja, se se trata de um veículo mais antigo (*Euro* 1), ou mais recente, com uma melhor eficiência e tecnologia (*Euro* 6), os resultados das emissões de CO<sub>2</sub> pouco variam. No gráfico 4.1a) que apresenta a curva do nível de CO<sub>2</sub> em função da velocidade, as emissões são relativamente próximas com as dos resultados obtidos nos diferentes cenários, como é possível observar no gráfico 4.2. Apesar da contínua melhoria que se traduz numa melhor eficiência dos veículos mais recentes, o seu peso continua a ser elevado devido aos mecanismos de segurança implementados os quais contribuem para um nível semelhante de emissões de CO<sub>2</sub>. No gráfico 4.1b) que apresenta a curva do nível de NO<sub>x</sub> em função da velocidade, verifica-se uma ligeira discrepância entre todas estas curvas, desde o (*Euro* 1 ao 6) as quais são explicadas devido às melhorias e implementações de filtros de partículas e catalisadores. Contudo, verifica-se uma grande semelhança entre todas estas curvas e as que serão vistas mais à frente neste capítulo 4 para os diferentes cenários.

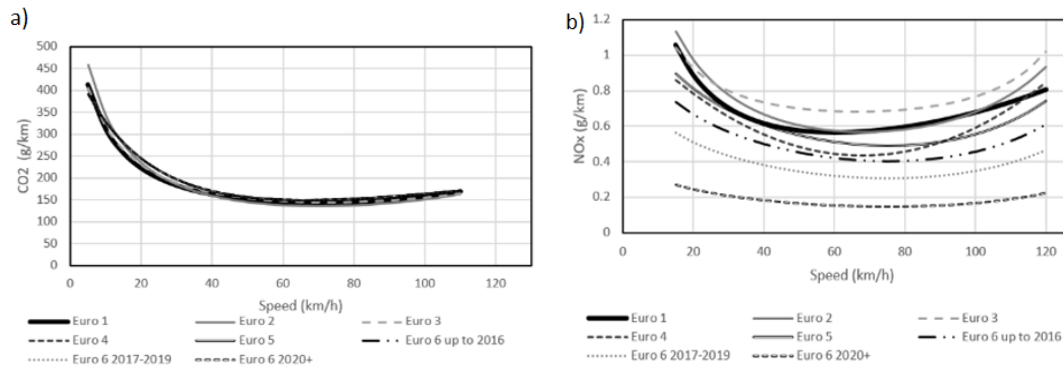


Figura 4.1: Curva do nível de: a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub>, em função da velocidade

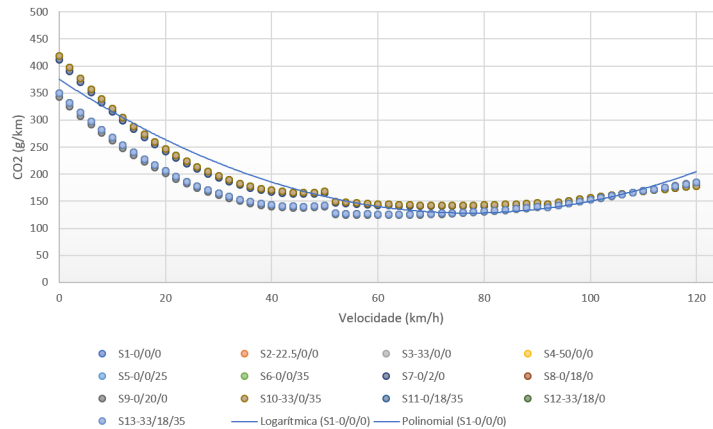


Figura 4.2: Curva do nível de CO<sub>2</sub> em função da velocidade para os diferentes cenários

## 4.1.1 Emissões do sistema

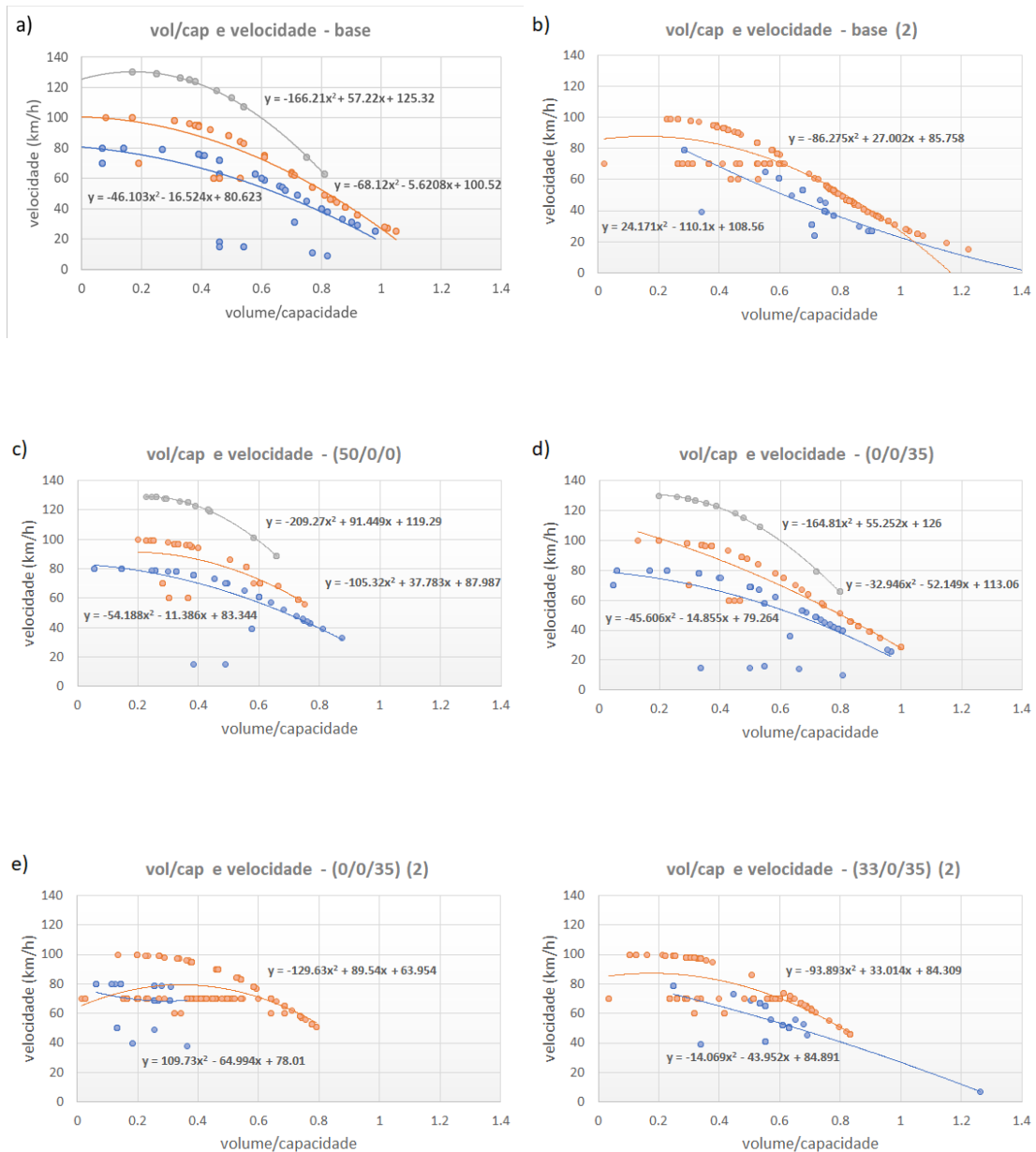


Figura 4.3: Curva da velocidade em função do volume/capacidade: a) cenário 1-rotas 1, b) cenário 1-rotas 2, c) cenário 4-rotas 1, d) cenário 6-rotas 1, e) cenário 6-rotas 2, f) cenário 10-rotas 2

● vias rurais      ● vias urbanas      ● autoestrada

Os resultados obtidos para as emissões totais em todo o sistema são apresentadas nos gráficos 4.3, 4.4a) e 4.4b). Nos gráficos 4.3 estão presentes 3 curvas, as vias rurais (azul), as vias urbanas/estradas nacionais (laranja) e as autoestradas (cinzento). Em ambos os gráficos 4.4 estão associadas 2 barras a cada cenário, as quais correspondem às 2 rotas analisadas, a rota 1 com valores sempre superiores à esquerda, e a rota 2 com valores sempre inferiores à direita.

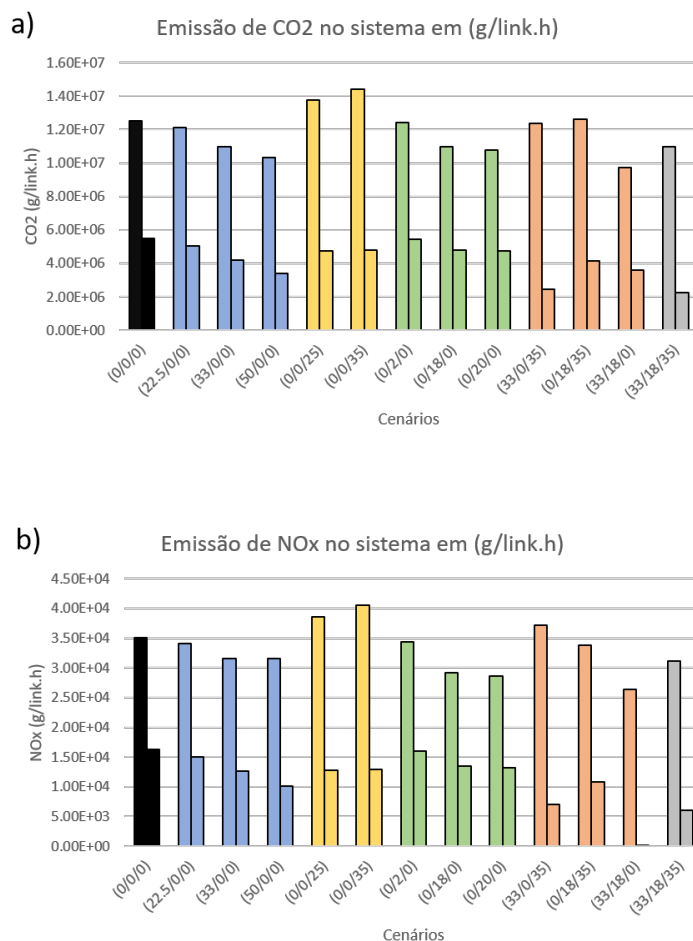


Figura 4.4: Emissões no sistema de: a) CO<sub>2</sub>, b) NO<sub>x</sub>

Inicialmente é possível com uma rápida observação por ambos os gráficos 4.4a) e 4.4b), verificar em como a rota 1, pela A1, apresenta um nível maior de emissões em todos os cenários, comparativamente à rota 2, pela N235 e IC2. Ao analisar os gráficos 4.3a) e 4.3b), observa-se que a rota 1 apresenta mais um gráfico adicional, devido à presença de 3 tipos de vias, as urbanas, nacionais, e a autoestrada, enquanto que a rota 2, apenas apresenta 2 curvas, as vias urbanas e nacionais. O facto desta rota 2, não possuir autoestradas, onde os veículos tomam velocidades superiores a 100 km/h, resulta num menor nível de emissões libertadas, o que não acontece na rota 1. Observando todos estes resultados de uma forma geral para todo o domínio de estudo, na rota 1 (A1) e na rota 2 (N235/IC2), todos os poluentes apresentam emissões inferiores ao caso base quando se trata apenas da penetração da mobilidade partilhada (cenários 2,3 e 4). Ao

analisar ambos os gráficos 4.3a) e 4.3c), é possível verificar que as equações que mostram a razão da velocidade em função do volume/capacidade para o cenário 4 apresentam um valor mais baixo, o que contribui para um menor valor das emissões.

Quanto maior é a penetração de VPs, ou seja, quanto maior é a ocupação dos veículos, menor é o número de viagens geradas, e consequentemente, menor é o nível de emissões gerado. Ao observar a gráfico 4.4a) e 4.4b), observa-se que o melhor resultado é obtido no cenário 4, onde existe 50% de VPs e 50% de veículos convencionais, resultando numa diminuição de 18% e 39% de CO<sub>2</sub>, e 10% e 38% de NO<sub>x</sub>, para a rota 1 e 2 respetivamente.

Com a penetração apenas da mobilidade elétrica (VEs) verifica-se que os níveis tanto de CO<sub>2</sub> como NO<sub>x</sub> diminuem, pois estes libertam um menor nível de emissões em relação aos veículos convencionais, obtendo assim valores menores que o cenário base. Em relação ao NO<sub>x</sub> é possível observar resultados ótimos, com uma penetração de 18% e 20% para a A1, melhores ainda que o cenário 4, devido ao baixo fator de emissão, de 0.2 g/kWh. O cenário 8 resulta numa diminuição de 13% de CO<sub>2</sub> e 17% de NO<sub>x</sub>, enquanto o cenário 9, apresenta 14% e 19% respetivamente, face ao cenário base, para ambas as rotas.

Na mobilidade autónoma (VAs), observa-se que os níveis tanto de CO<sub>2</sub> como NO<sub>x</sub> aumentam em relação ao cenário base na rota 1. Comparando ambos os gráficos 4.3a) e 4.3d), podemos observar que no gráfico 4.3d) as equações apresentam um valor maior, principalmente na nacional. Para uma maior relação [volume/capacidade], ou seja, um maior congestionamento da via, obtemos velocidades menores, associados a "para-arrancas", o que posteriormente leva a um maior nível de emissões. Este tipo de mobilidade em termos de emissões totais, está associado ao aumento do volume do número de veículos, resultante de uma maior capacidade dos *links*. O cenário 6 apresenta assim o pior cenário para a rota 1, com um aumento de 15% e 16% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

Porém na rota da N235 e IC2, este tipo de mobilidade adquire valores um pouco menores que o cenário base e a mobilidade elétrica, obtendo assim uma redução de 13% e 20% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> respetivamente, face ao cenário base. Ao comparar o gráfico 4.3e), com o cenário base no gráfico 4.3b), observa-se que a curva que relaciona o volume/capacidade com a velocidade, tanto a das vias urbanas, como a das vias nacionais, são curvas compreendidas entre os 50 e os 80 km/h, o que provoca um efeito de poucas emissões, ao contrário do que acontece na rota 1. Além disso, não existem muitos *links* com velocidades inferiores a 40km/h.

Contudo, em 2030 não teremos apenas a penetração de 1 mobilidade entre os veículos convencionais, mas sim a penetração de vários tipos de veículos, um pouco como já acontece agora com a *Uber*, ao usar VEs. No caso dos cenários com mobilidade combinada (10, 11, 12 e 13), verifica-se que o cenário 12 (com uma penetração de 33% partilhados e 18% elétricos) obtém valores muito menores de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em relação a todos os outros cenários, alcançando uma redução de 23% de CO<sub>2</sub> e 25% de NO<sub>x</sub> na rota 1 face ao cenário base, assim como o cenário 13 que apresenta valores também baixos, mas ligeiramente mais altos que o cenário 12 mas com uma redução de 13% e 11% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> respetivamente na rota 1 face ao cenário base. Como referido anteriormente, isto deve-se ao facto de ambas estas mobilidades apresentarem características que permitem um menor nível de emissões libertadas. O cenário 12 diferencia-se de todos os outros em ambas as rotas, pois apresenta diminuições superiores a 23% face ao cenário base.

Ao observar o gráfico 4.5 do cenário 13, que além da mobilidade elétrica e partilhada (cenário 12), apresenta a mobilidade autónoma, é possível verificar baixos valores de emissão, contudo superiores em 13% de CO<sub>2</sub> e 18% de NO<sub>x</sub> em relação ao cenário 12,

no gráfico da figura 4.5 também não se verificam muitos pontos abaixo dos 40 km/h, o que posteriormente não contribui para o congestionamento das vias e um nível alto de emissões. Neste cenário apesar da ligeira diminuição dos níveis de emissão na rota 1, a rota 2 resulta numa grande diminuição com valores de 59% e 63% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, em relação ao cenário base.

Concluindo assim que os cenários 12, 13, 4 e 9 são os que apresentam os níveis mais baixos de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, em termos de emissões total do sistema, para a rota 1, sendo o cenário 12 o que mais se destaca. Na rota 2 a penetração da mobilidade autónoma resultou num decréscimo das emissões entre 13% e 22% comparativamente ao cenário base. Além dos cenários 12, 13 e 4, o cenário 10 apresenta também um decréscimo das emissões na rota 2 com um valor superior a 56% em relação ao cenário base. Os cenários que mais se destacam pela diminuição do nível de emissões são o cenário 12 e 13, com o menor valor de NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> respetivamente.

Assim como foi observado que os cenários 5 e 6 apresentam um aumento das emissões na rota 1, o mesmo acontece com o cenário 10, pois apresenta um aumento das emissões de NO<sub>x</sub> em 6% em relação ao cenário 1, devido à integração de apenas VAs. Em relação ao nível de CO<sub>2</sub> no cenário 10, apenas um ligeiro aumento de 0.6% se verifica.

Na rota 2, os cenários 2, 6 e 7 não devem ser implementados, devido ao pouco efeito que têm, sendo que o 7 reduz mesmo muito pouco o valor das emissões face ao cenário base, resultado assim no pior cenário para esta rota. No entanto, o caso do cenário 10 destaca-se pois apresenta níveis tanto de CO<sub>2</sub> como NO<sub>x</sub> baixos. Ao visualizar o gráfico 4.3f) é possível observar que para um [volume/capacidade] maior que 0.8, não se verificam velocidades menores que 40km/h, ao contrário do que acontece na figura 4.2b).

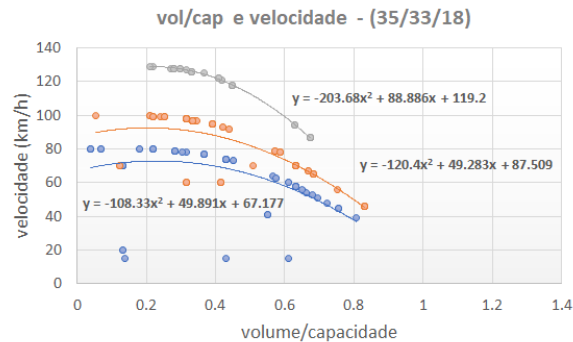


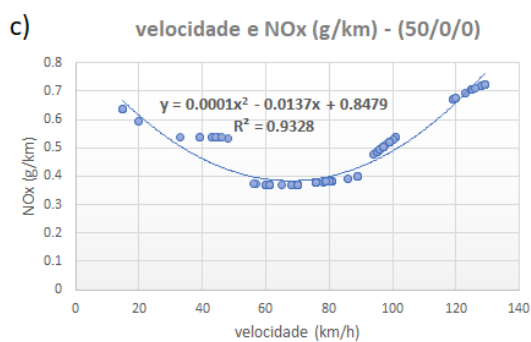
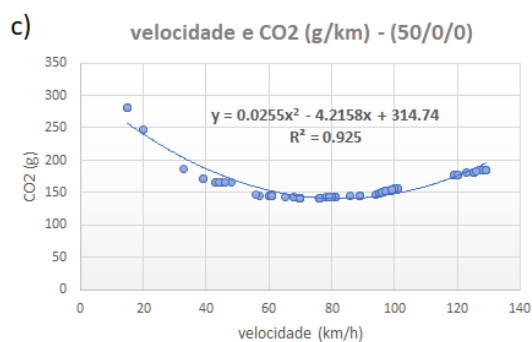
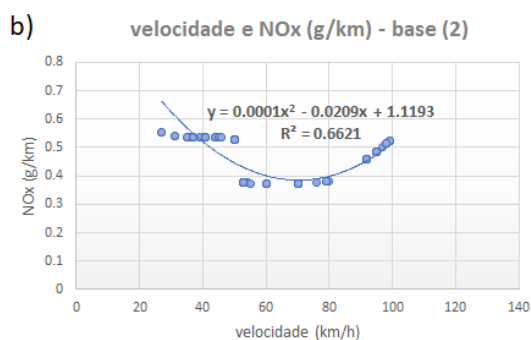
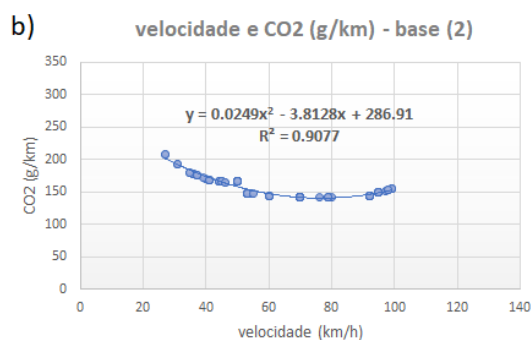
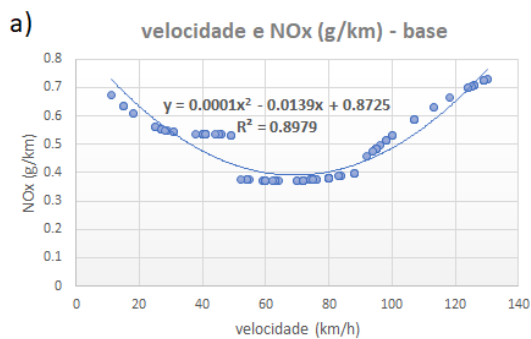
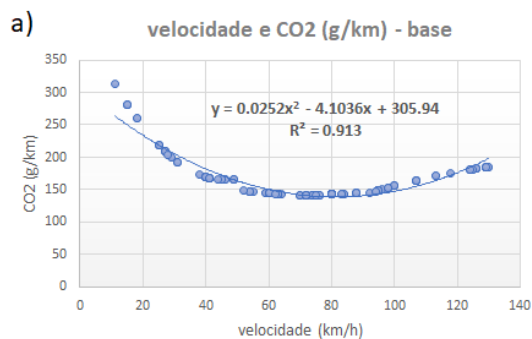
Figura 4.5: Curva da velocidade em função do volume/capacidade para o cenário 13 na rota 1

Por último, o cenário 13 (apresentado no gráfico 4.5) que combina os 3 tipos de mobilidade, mostra excelentes resultados, que podem ser notados pelos baixos coeficientes que as 3 equações do gráfico 4.5 apresentam, comparativamente ao cenário base.

De maneira a haver uma redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> libertadas mais propriamente no sentido Coimbra-Aveiro, em ambas as rotas em simultâneo, o cenário 4 com uma penetração de 50% de VPs, o cenário 12 com uma penetração de 33% VPs e 18% VEs, e o cenário 13 (33/18/35), que combina os 3 tipos de mobilidade, são os cenários que devem ser implementados.



## 4.1.2 Emissões por veículo



Continuação da lista de figuras na próxima página.

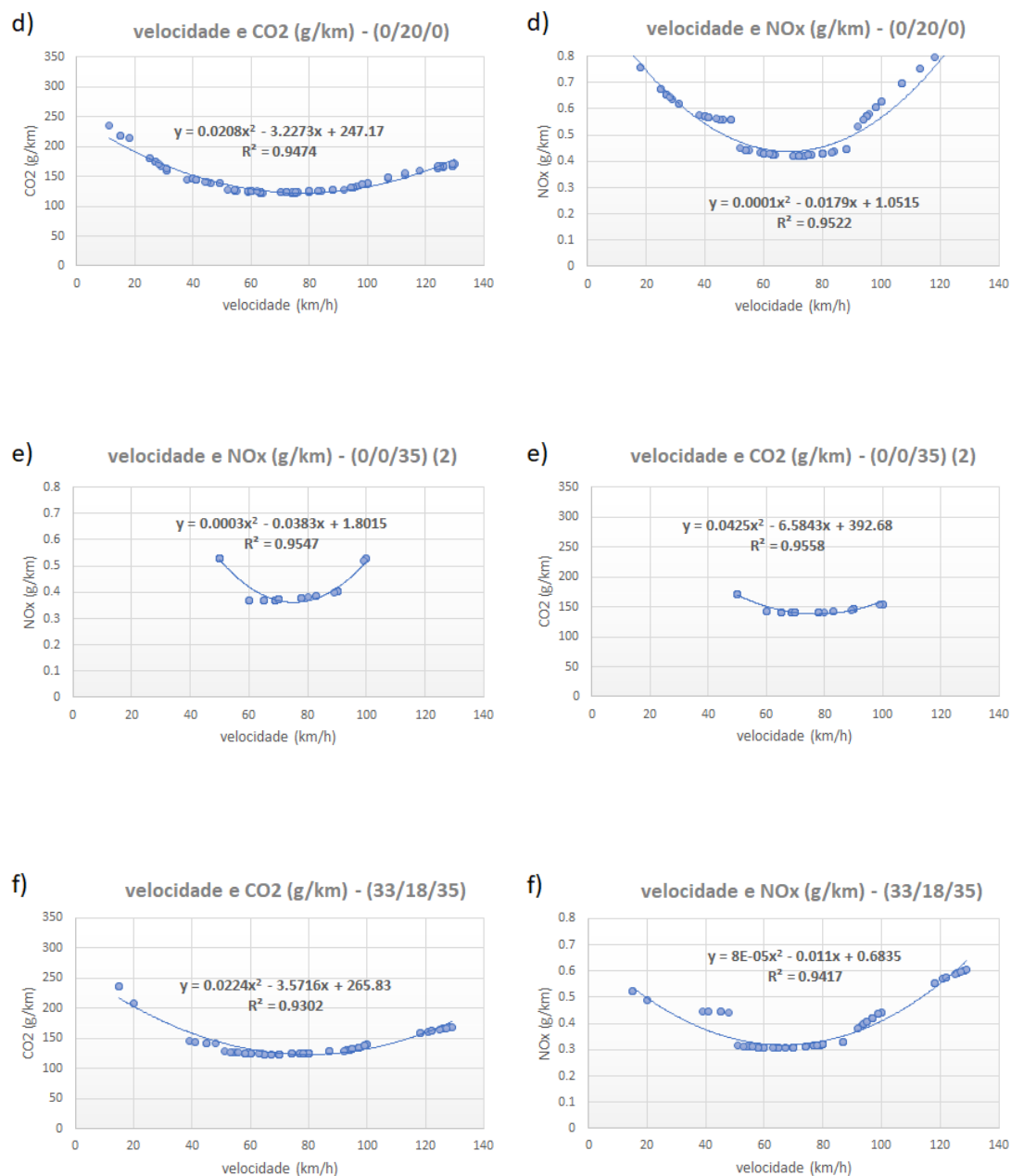


Figura 4.6: Curva do nível de CO<sub>2</sub> (à esquerda) e de NO<sub>x</sub> (à direita) em função da velocidade para: a) cenário 1 - rota 1, b) cenário 1 - rota 2, c) cenário 4 - rota 1, d) cenário 9 - rota 1, e) cenário 6 - rota 2, f) cenário 13 - rota 1

Após a análise das emissões em toda a rede, analisou-se também as emissões por veículo em (g/veí), que estão apresentados nos gráficos 4.7a) e 4.7b).

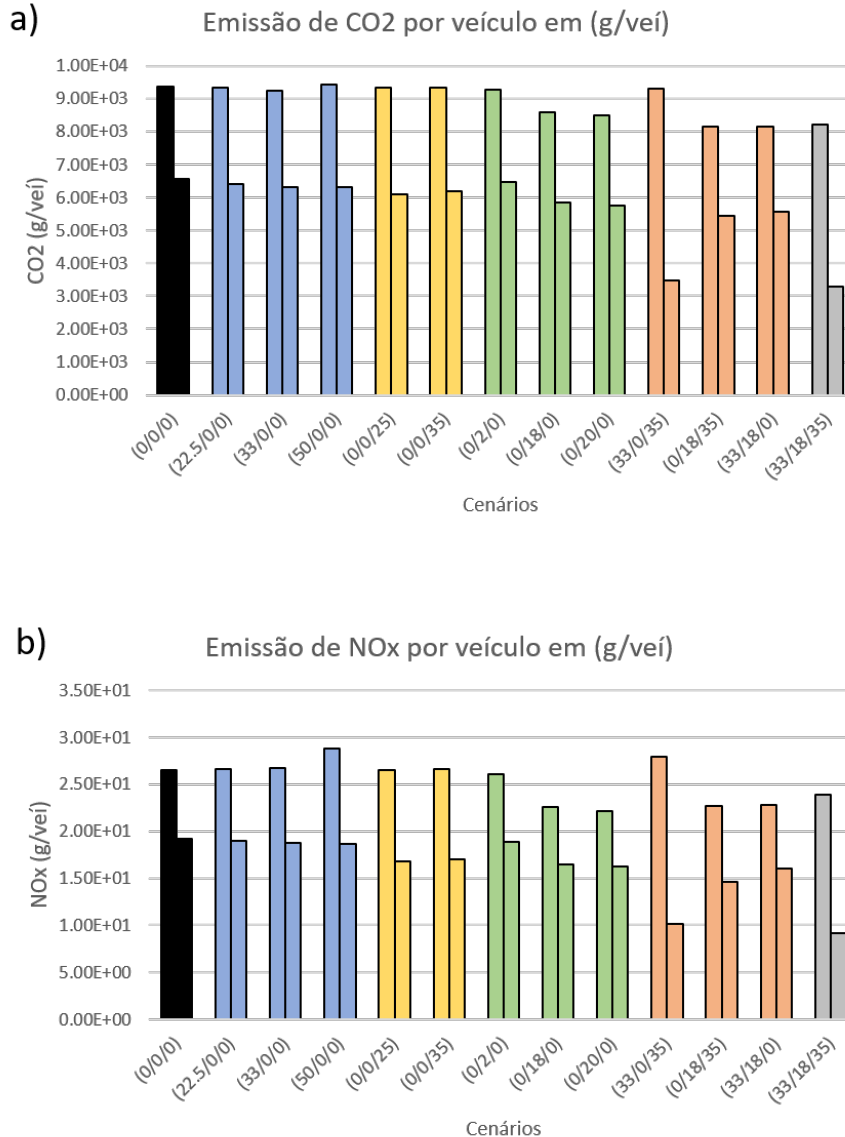


Figura 4.7: Emissões por veículo: a)CO<sub>2</sub>, b)NO<sub>x</sub>

Ao analisar ambos estes gráficos 4.7a) e 4.7b) observa-se que as emissões tal como anteriormente, na rota 1 são sempre superiores às da rota 2.

Analisando apenas a mobilidade partilhada, verifica-se tal como no capítulo interior, que as emissões decrescem com o aumento da taxa de ocupação de cada veículo, ou seja, com o aumento da penetração de VPs no cenário. No entanto, na rota 1 verifica-se um aumento de 1% e 8% do nível de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> no cenário 4, ultrapassando até ligeiramente os níveis do cenário base. Este ligeiro aumento entre ambos os cenários é mostrado através da grande semelhança nas equações dos gráficos 4.6a) e 4.6c) para o CO<sub>2</sub>, e 4.6a) e 4.6c) para o NO<sub>x</sub>. Apesar da grande semelhança em ambas as equações,

no gráfico base obtém-se um mínimo global de 139 g/km de CO<sub>2</sub> para uma velocidade de 81 km/h, enquanto que no gráfico do cenário 4, obtém-se um mínimo global de 140 g/km para uma velocidade de 83 km/h, ou seja um pouco superior ao cenário base. Para o NO<sub>x</sub> obteve-se uma evolução similar mas verifica-se um número maior de pontos para velocidades superiores a 110 km/h no cenário 4, o que posteriormente contribui para um nível maior destas emissões.

Os VEs mais uma vez, nos cenários 7,8 e 9, tal como na secção anterior, mostram uma redução das emissões por veículo. Na A1, o cenário 9 alcança um decréscimo dos valores de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, obtendo assim o cenário 9, o título de melhor cenário, com uma diminuição de 14% e 19% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Ao comparar o gráfico 4.6d) com o gráfico 4.6a) do lado esquerdo (CO<sub>2</sub>), observa-se que o gráfico 4.6d) apresenta uma equação quadrática com coeficientes menores e com um mínimo global também menor de 122 g/km de CO<sub>2</sub> para uma velocidade atual de 78 km/h em comparação com o cenário base (Fiori *et al.* 2019). Além disto, este gráfico não apresenta pontos superiores a 235 g/km de CO<sub>2</sub>, ao contrário do que acontece no cenário base com pontos a atingir os 312 g/km de CO<sub>2</sub> para uma velocidade de 11 km/h.

Na rota 2, apesar do decréscimo no nível das emissões, não se verifica grande diferença dos valores de emissões, face ao cenário base, apresentando diminuições no nível de emissões superiores a 12%.

Na mobilidade autónoma (VAs), diferentemente do que acontece na rota 1, nas emissões absolutas do sistema, as emissões diminuem em ambas as rotas, no entanto a rota 2 salienta-se, pois obtém baixos valores de emissão tanto de CO<sub>2</sub> como de NO<sub>x</sub>, com uma diminuição das emissões aproximadamente de 6% e 12% respetivamente. Esta diferença entre ambas as rotas, deve-se ao facto do aumento da capacidade na autoestrada A1, o que não acontece na rota 2. Pelo gráfico 4.5e) observa-se que as velocidades para este cenário encontram-se num intervalo pequeno de emissões, entre 150 e 172 g/km de CO<sub>2</sub>, para um intervalo de velocidades compreendido entre 50 e 100 km/h, ao contrário do que acontece no cenário base com velocidades de 27 a 40 km/h a que corresponde valores de emissão de CO<sub>2</sub> superiores a 172 g/km. Em relação ao NO<sub>x</sub> que se pode observar no gráfico 4.6e), esta diferença é notada pela mesma razão.

Em relação às penetrações de mobilidade combinada, todos os cenários 10, 11, 12 e 13, apresentam uma diminuição do nível de emissões em relação ao cenário base, no entanto, é de salientar o cenário 12, e o cenário 11 com os valores mais baixos de entre estes últimos cenários referidos, na rota 1, com uma diminuição aproximadamente de 13% e 16% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. O cenário 11 apesar dos bons resultados, continua sendo pior que o cenário 9. Já na rota 2, o cenário 11 destaca-se como um dos melhores cenários, tomando a posição de segundo lugar, atrás do cenário 13.

Na rota 1, o cenário 12 (33/18/0), o gráfico 4.8 apresenta um grande número de pontos entre os 40 e 100 km/h com um valor de emissão compreendido entre os 123 e os 152 g/km de CO<sub>2</sub>. Além disso atinge um ponto mínimo global de 123 g/km de CO<sub>2</sub> para uma velocidade de 79 km/h, o que posteriormente provoca um efeito de muito baixas emissões de CO<sub>2</sub>. O semelhante acontece em relação aos níveis de NO<sub>x</sub>

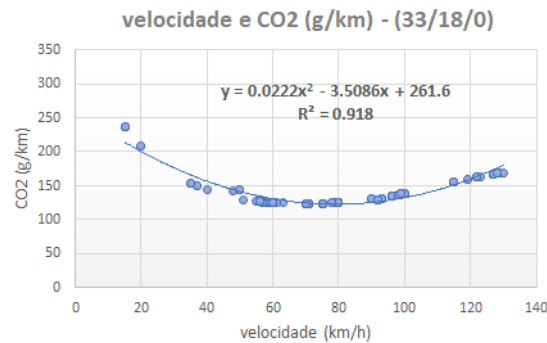


Figura 4.8: Curva do nível de CO2 em função da velocidade para o cenário 12 e rota 1

Por último, o cenário 13, obtém os menores valores de emissão na rota 2, obtendo uma diminuição de 50% e 54% de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, assim como uma diminuição das emissões de 12% na rota 1. Isto é possível verificar devido à grande semelhança entre ambos os gráficos 4.8 e 4.6f) à esquerda.

Para concluir, em termos de emissões por veículo, e tendo como visão o ano de 2030 o cenário 11 e, principalmente, o cenário 13 são os melhores cenários a implementar, ao considerar ambas as rotas em simultâneo.

## 4.2 Pontos críticos da rede

A distribuição das emissões pela rede neste domínio de estudo não é realizada de forma uniforme, pelo que nesta secção irão ser identificados os pontos críticos no cenário base, em termos de emissões do sistema.

Para que se pudesse visualizar melhor as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em gramas/link em toda a rota, foi introduzido nos parâmetros gráficos do VISUM, uma escala com diferentes intervalos de valores associados a diferentes cores, tal como apresentado nas figuras 4.9a) e 4.9b) a seguir:

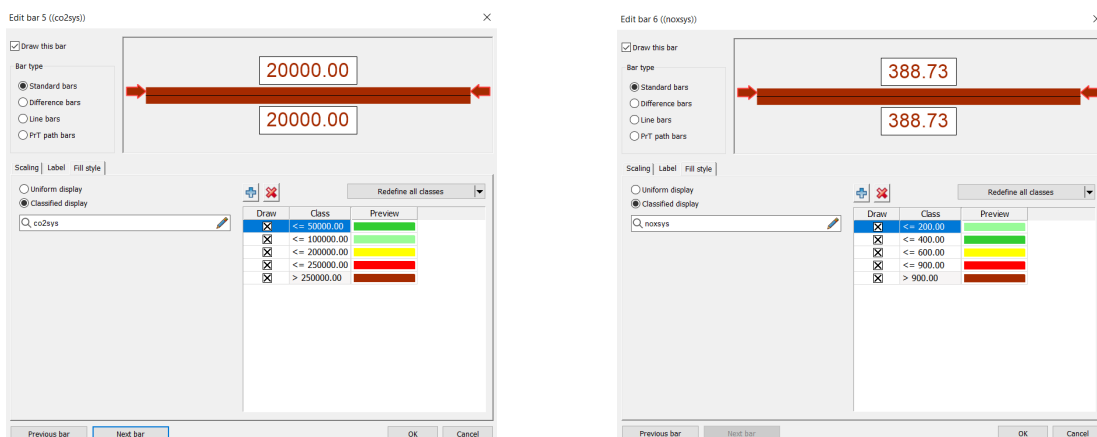


Figura 4.9: Escala com intervalos de: a) CO<sub>2</sub>, b) NO<sub>x</sub>

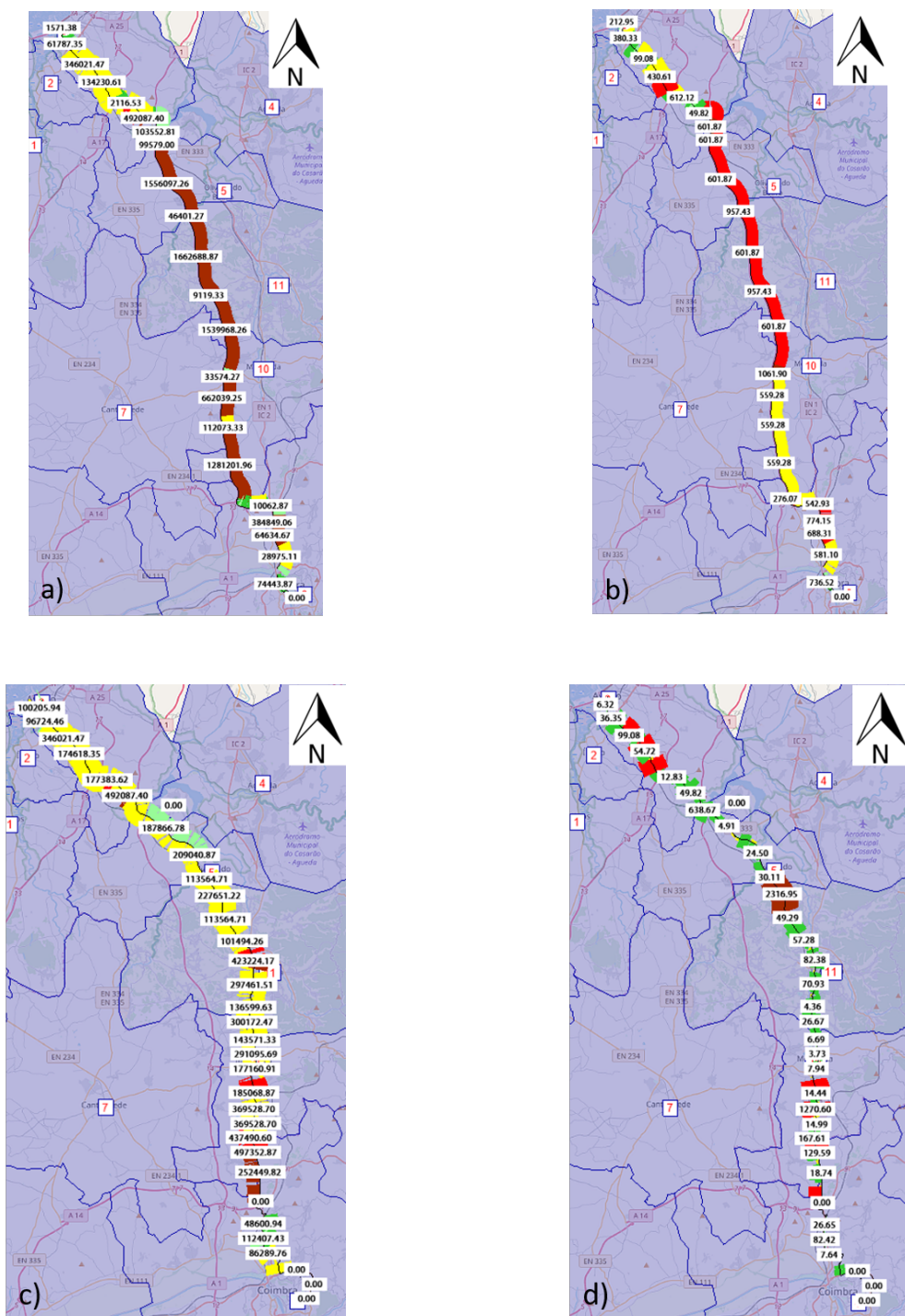


Figura 4.10: Mapa de emissões:a)rota 1-CO<sub>2</sub>, b)rota 1-NO<sub>x</sub>, c)rota2-CO<sub>2</sub>, d)rota2-NO<sub>x</sub>

Ao analisar a rota 1, no cenário base, na figura 4.10a), verificam-se várias zonas críticas distribuídas pelo domínio de estudo, tais como: na A1 em Oliveira do Bairro e Barcouço, e no Bairro de Santa Apolónia na A14, representado nas figuras 4.11a), 4.11b) e 4.11c), respetivamente.



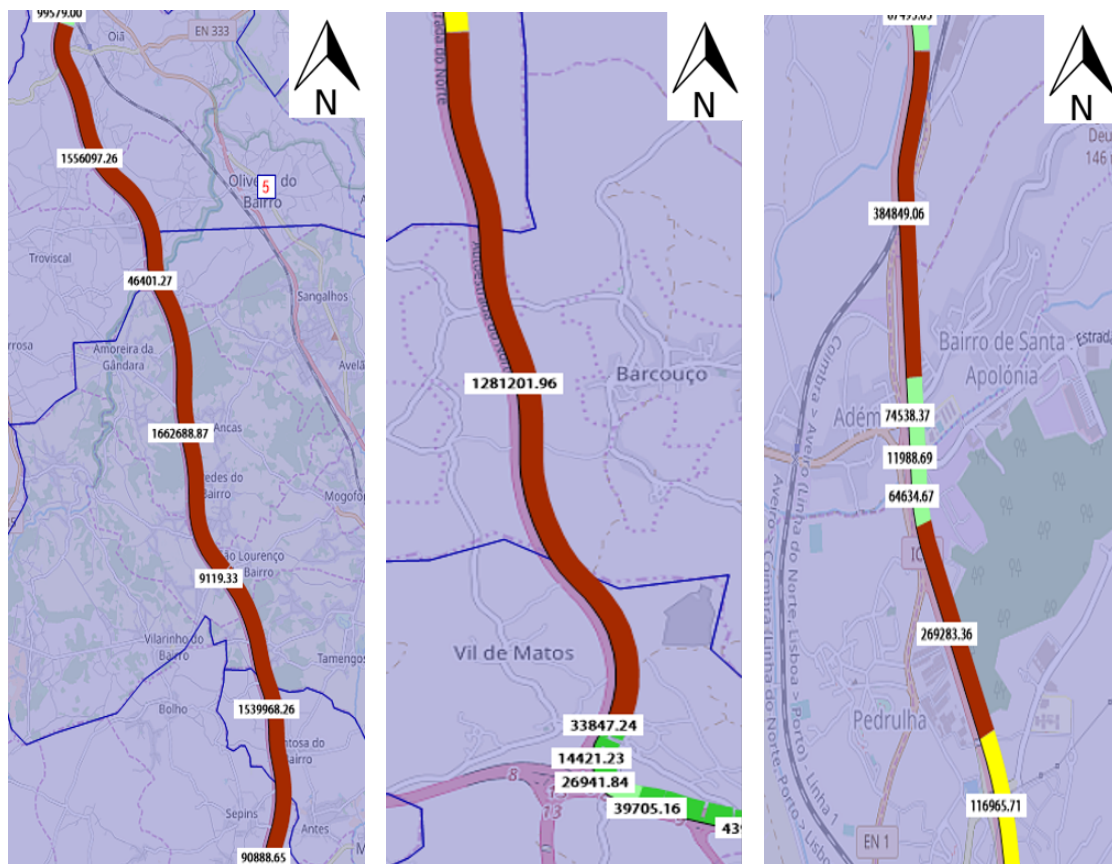


Figura 4.11: a)Oliveira do Bairro, A1; b)Barcouço, A1; c)Bairro de Santa Apolónia, IC2

Seguidamente o mesmo foi realizado na rota 1, mas para as emissões de  $\text{NO}_x$ .

Analisando a figura 4.10b), verifica-se que tal como para as emissões de CO<sub>2</sub>, as zonas críticas identificadas são semelhantes, tal como mostram as figuras 4.12a), 4.12b) e 4.12c) a seguir demonstram.



Figura 4.12: a)Troço A1-A14 e IC2 em Santa Apolónia; b)Mealhada, A1; c)Zona Industrial de Aveiro, A1





Ao realizar uma comparação do nível de CO<sub>2</sub>, face à rota 1, verifica-se em comum como pontos críticos, a Zona Industrial de Aveiro. Através da figura 4.10d) que representa o mapa de emissões de NO<sub>x</sub> em gramas para o cenário base, na rota 2, verificam-se como pontos críticos os seguintes: São Bernardo na EN235 (fig. 4.14a)), Oliveira do Bairro na A1(fig. 4.14b)), e Pampilhosa na IC2(fig. 4.14c)).

Este alto nível de emissões, está associado a uma maior velocidade atual dos veículos, e um maior volume de tráfego nos *links*. No software *VISUM*, foram definidas 2 novas escalas de intervalos associadas a diferentes cores, para as velocidades e volumes, como se pode observar nas figuras 4.15a) e 4.15b).

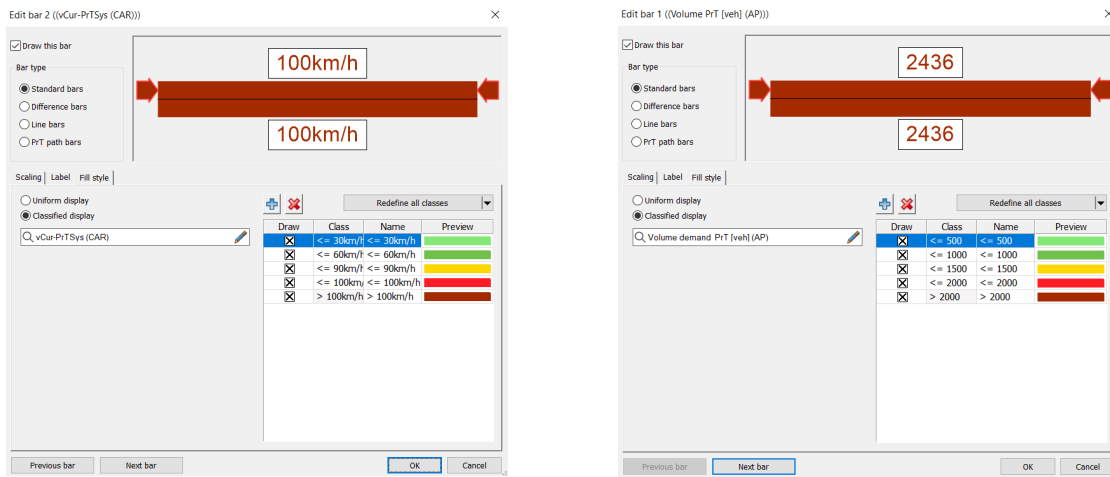


Figura 4.15: Escala com intervalos de:a)velocidades correntes dos carros em km/h, b) volume de veículos ligeiros

Depois de definidas estas escalas, foram visualizados os resultados para a velocidade e volume em ambas as rotas, representados nas figuras seguintes.

Tal como a velocidade, os volumes de tráfegos também estão associados às emissões libertadas. Ao analisar ambas as figuras de velocidade e volume nas 2 rotas, nota-se a relação que ambas têm com os pontos críticos relativos às emissões do sistema, identificados anteriormente. Notando-se que velocidades superiores a 90/100 km/h, e volumes de tráfego superiores a 1500 veículos, resultam em valores de emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> superiores a 2E6 g/link.h e 800 g/link.h respetivamente.

Além disto, também se deduz que os grandes volumes de tráfego estão associados a uma menor velocidade corrente dos veículos. Este maior volume de tráfego relacionado com uma baixa velocidade compreendida entre 25 e 49 km/h, é resultante de *links* que apresentam um maior congestionamento com um número de veículos compreendido entre 1077 e 2436, o que posteriormente implica um maior nível das emissões.

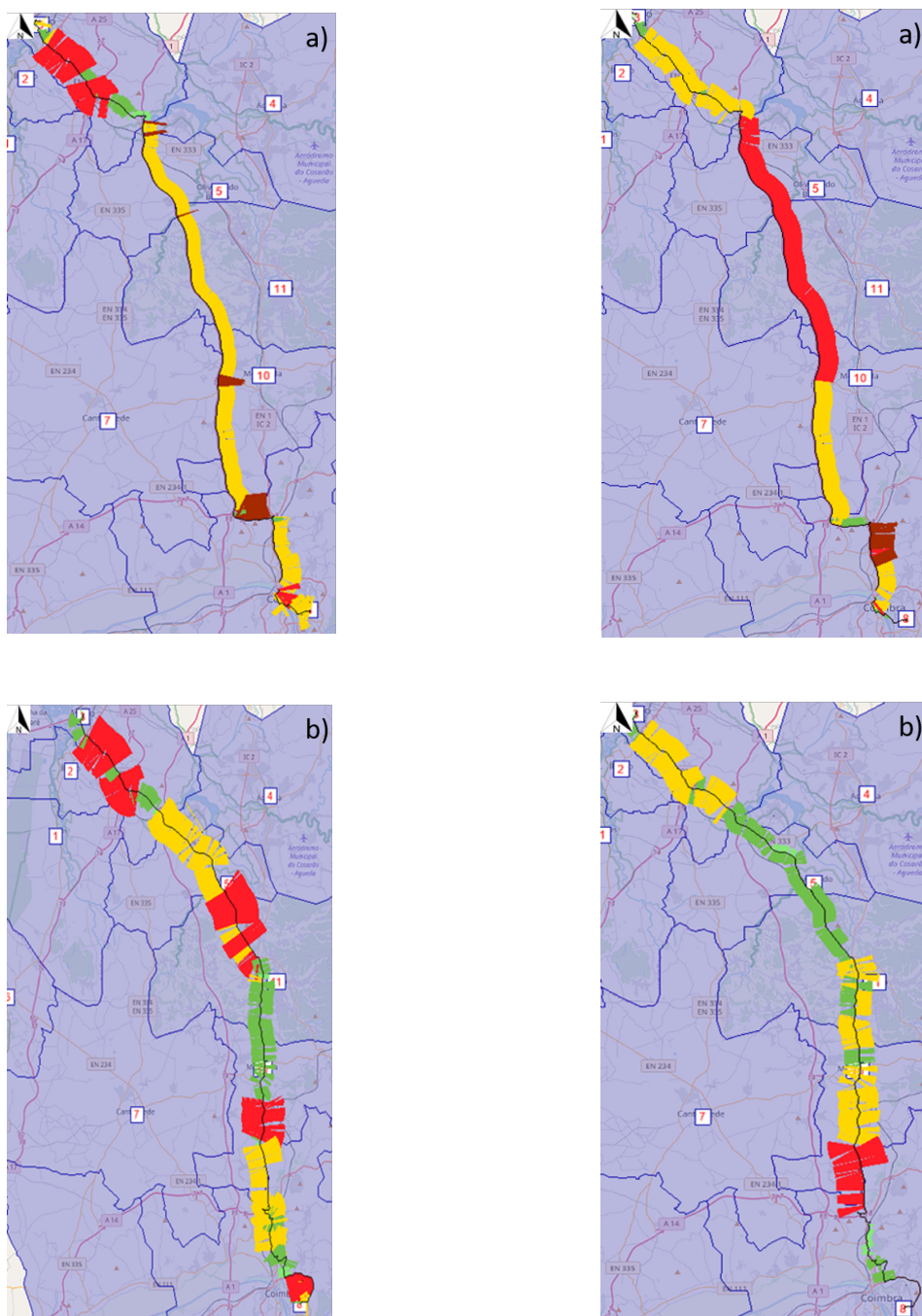


Figura 4.16: Mapa de velocidades atuais dos carros em km/h (à esquerda) e volume de veículos ligeiros (à direita): a) rota 1, b) rota 2

## Capítulo 5

# Conclusão

O objetivo desta dissertação de mestrado integrado foi fornecer informação sobre os efeitos de VAs, VEs, VPs, a sua combinação e VPAEs no tráfego interurbano, na hora de ponta. O estudo de caso foi realizado entre a cidade de Coimbra e Aveiro, focando-se na análise de 2 rotas, a A1, e a N235/IC2, no sentido Coimbra a Aveiro.

O software usado para as simulações foi o *VISUM*, do grupo PTV, que permitiu analisar os tempos de viagem e volumes de tráfego. Uma metodologia para estimar as emissões foi usada, tanto para um veículo convencional típico português a gasolina e diesel, como para os veículos elétricos. A simulação no cenário base foi validada e, posteriormente, 13 cenários foram implementados com as respetivas taxas de penetração.

As tecnologias em desenvolvimento focadas neste trabalho, são a partilha de veículos, a eletrificação e a automação. Os veículos que prevêm estas tecnologias podem alterar a mobilidade interurbana a um nível macroscópico, contudo a força destes efeitos depende da rapidez da sua penetração no mercado, bem como a sua magnitude. Portanto, todo este trabalho foi realizado assumindo diferentes níveis de penetração no mercado encontradas na literatura para o ano de 2030.

Espera-se que a tecnologia autónoma, partilhada e elétrica desenvolvam-se em conjunto e ampliem a sua utilidade mutuamente, esperando a penetração de VPAEs mais facilmente.

Com todo o desenvolvimento desta dissertação, as conclusões retiradas da análise dos resultados foram os seguintes:

- A rota 2 (N235/IC2) face à rota 1 (A1), apresentou um menor nível das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, tanto a nível de emissões do sistema como emissões por veículo.
- Em termos de emissões do sistema, os cenários que apresentam melhores resultados são o cenário 4 (50/0/0), 12 (33/18/0) e 13 (33/18/35).
- Em termos de emissões por veículo, os cenários que apresentam melhores resultados são o cenário 11 (0/18/35) e 13 (33/18/35).
- A mobilidade autónoma (cenário 6) com altas penetrações (35% VAs), em termos de emissões do sistema, e a mobilidade partilhada (cenário 4) com altas penetrações (50% VPs), em termos de emissões por veículo, apresentaram altos valores de emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. No cenário 6 o aumento do congestionamento provocou

uma diminuição da velocidade atual dos veículos. No cenário 4 a redução do congestionamento provocou um aumento da velocidade atual dos veículos, resultando assim num nível maior de emissões libertadas.

- Ao realizar uma comparação entre todos os cenários, em ambas as rotas e considerando tanto emissões do sistema como por veículo, os cenários mais promissores são o cenário 12 e 13, sendo ambos estes cenários constituídos por 33% VPs e 18% VEs.
- A Zona Industrial de Aveiro, Barcouço e Oliveira do Bairro na A1, e o Bairro de Santa Apolónia, foram os troços que se notaram ser mais sensíveis ao nível das emissões, mostrando-se assim como uma das vias mais críticas da rede, e principal contribuidor de GEE, devido ao maior volume de tráfego.
- A nível de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, a IC2 em Santa Apolónia, na rota 1, apresentou o mesmo ponto crítico.
- Ambas as rotas, em termos de emissões do sistema de CO<sub>2</sub>, apresentaram a Zona Industrial de Aveiro como um ponto crítico em comum.
- Ao analisar os pontos críticos, observou-se que menores velocidades atuais estão associadas a um aumento do volume de tráfego.

Este trabalho contribuiu, assim para avaliar os efeitos da implementação de cenários com taxas de penetração de VAs, VPs, VEs, as suas combinações e VPAEs, em 2 rotas (A1 e N235/IC2), no sentido de Coimbra a Aveiro, em termos de emissões por veículo e emissões do sistema (CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>). Além disto, foi possível identificar quais as vias mais sensíveis ao nível das emissões do sistema em (g/link), de forma a mostrar as vias onde o cenário base demonstra mais desvantagens. É de concluir que nesta rede o cenário 12 com uma penetração de 18% VEs e 33% VPs, e o cenário 13 que combina este último, com uma penetração de 35% VAs, destacou-se pelo facto de diminuir as emissões e melhorar o desempenho da rede a nível de congestionamento, permitindo uma melhor fluidez e menor geração de viagens, ao partilhar mais veículos. No entanto os cenários 5 e 6 com apenas penetração de mobilidade autónoma em termos de emissões do sistema e o cenário 4 com 50% de VPs a nível de emissões por veículo demonstraram um aumento das emissões de CO<sub>2</sub> de 10 a 16% e de 1 a 8% respetivamente, face ao cenário base.

## 5.1 Limitações

Existem limitações neste trabalho relacionadas com as incertezas inerentes aos modelos usados.

Em primeiro lugar, a falta de dados a nível do exato valor dos volumes de tráfego e tempos de viagem na hora de ponta não permitiu uma validação mais exata. Além disso, a validação quanto ao número de viagens geradas por zona deverá ser melhorada com dados recentes de matrizes origem destino e preferencialmente incorporando matrizes de procura origem-destino baseadas não só na distribuição da população mas também no número de empregos de cada zona.

A implementação da mobilidade autónoma é simulada com base num artigo que mostra o fator de aumento da capacidade das vias, dependendo da taxa de penetração de

VAs. Existe pelo menos um outro artigo desenvolvido por (Steven E. Shladover 2016) que relaciona estes 2 parâmetros. Caso os desenvolvimentos não sejam os esperados, os valores de capacidade podem ser alterados. Entretanto o grupo PTV também se encontra a trabalhar na construção da modelação de VAs, mas estes ainda são relativamente limitados (PTVGroup-VISUM ).

As previsões dos investigadores quanto ao nível de penetração de cada tecnologia no mercado pode não ser a correta. Informações mais precisas poderiam ser obtidas através dos fabricantes de automóveis ou da própria tecnologia, contudo estes são bastante reservados, não querendo compartilhar muitos dados.

Devido ao confinamento do caso de estudo ter sido realizado apenas para a hora de ponta, a generalização para outras horas do dia, ou mesmo o dia todo não pode ser feita de modo preciso. Isto tem um efeito nas intensidades de tráfego e também sobre as suposições feitas em termos de ocupação do veículo. O uso deste caso de estudo limita a generalização dos resultados apenas a partes de cidades com redes similares. Os efeitos nos diferentes cenários simulados sobre as emissões, por exemplo, podem ser muito diferentes para uma rede com um número maior de vias nas estradas, ou mais interseções.

Por último como este caso de estudo se trata de uma macrosimulação, não são simulados pormenores maiores que podem ter um grande impacto, como o facto das acelerações e desacelerações em cruzamentos e semáforos, bem como ultrapassagens. Além disso a componente das portagens não foi tida em conta nas autoestradas.

## 5.2 Pesquisa futura

Nesta secção são apresentadas algumas das tarefas que podem ser exploradas em trabalhos futuros.

Em primeiro lugar, mais pesquisa e dados necessitam de ser obtidos para que se possa validar melhor o modelo de simulação, e assim mostrar resultados próximos da realidade. Estes dados poderão ser obtidos através de uma maior monitorização dos volumes de tráfego nas estradas, assim como o uso de sistemas de monitorização de emissões nos veículos.

Em segundo lugar, mais informação é necessária acerca do comportamento dos VPAEs de modo a simular os parâmetros de condução de forma mais rigorosa e precisa. Os VAs podem ser simulados definindo uma velocidade ótima limite compreendida entre um valor a que corresponde um baixo nível das emissões, para todos os *links* de ambas as rotas.

Em terceiro lugar, em termos de mobilidade partilhada, as realocações deviam ser simuladas, assim como ter em conta a combinação de viagens. Para estudar esta dinâmica de tráfego, começar por uma pequena cidade ao invés de uma rede tão grande seria o melhor. Contudo esta mobilidade partilhada deve-se mover de maneira diferente entre as cidades, provocando tanto um maior como um menor número de viagens e distância percorrida.

Finalmente, num trabalho futuro o transporte público deverá ser igualmente considerado tal como autocarros e comboios, podendo assim estudar de que maneira os VPAEs teriam impacto neste tipo de transporte.

Intentionally blank page.

# Bibliografia

- [Anagnostopoulos 2012] Christos-Nikolaos Anagnostopoulos. Modeling Transport, 4th Edition (de Dios Ortuzar, J. and Willumsen, L.G.; 2011 [Book Review]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 4(1):40–41, 2012.
- [Anderson *et al.* 2014] James M Anderson, Nidhi Kalra, Karlyn D Stanley, Paul Sorensen, Constantine Samaras and Oluwatobi A Oluwatola. Autonomous Vehicle Technology A Guide for Policymakers. 2014.
- [Apur 2018] Apur. Impacts and Portential benefits of AVs. 2018.
- [Auld *et al.* 2017] Joshua Auld, Vadim Sokolov and Thomas S. Stephens. Analysis of the Effects of Connected–Automated Vehicle Technologies on Travel Demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2625(1):1–8, jan 2017.
- [AutonomousDriving 2016] AutonomousDriving. Autonomous Driving. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48847-8>, 2016.
- [Badin *et al.* 2013] F. Badin, F. Le Berr, H. Briki, J-C. Dabadie, M. Petit, S. Magand and E. Condemine. Evaluation of EVs energy consumption influencing factors, driving conditions, auxiliaries use, driver’s aggressiveness. *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pp. 1–12, nov 2013.
- [Bandeira 2009] Bandeira. Modelo de uso do solo de Aveiro: Impacto na mobilidade e qualidade do ar. 2009.
- [Barth *et al.* 2008] Matthew Barth, Kanok and Boriboonsomsin. Real-World CO<sub>2</sub> impacts of traffic congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2058. (951):163–171, 2008.
- [Bauer *et al.* 2018] Gordon S. Bauer, Jeffery B. Greenblatt and Brian F. Gerke. Cost, Energy, and Environmental Impact of Automated Electric Taxi Fleets in Manhattan. *Environmental Science & Technology*, 52(8):4920–4928, apr 2018.
- [Berveling *et al.* 2017] Jaco Berveling, Gelauff George, Taede Tillema, Jan van der Waard, Jaco Berveling and Saeda Moorman. Paden naar een zelfrijdende toekomst. 2017.
- [Bloomberg 2016] Bloomberg. Electric vehicles to be 35% of global new car sales by 2040 — BloombergNEF. 2016.

- [Boesch *et al.* 2016] Patrick M. Boesch, Francesco Ciari and Monica Menendez. Autonomous Vehicle Fleet Sizes Required to Serve Different Levels of Demand. 2016.
- [Bose *et al.* 2003] Bose, Arnab and Petros A. Ioannou. Analysis of traffic flow with mixed manual and semiautomated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 4(4):173–188, 2003.
- [Boyaci *et al.* 2015] Burak Boyaci, Konstantinos G. Zografos and Nikolas Geroliminis. An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems. *European Journal of Operational Research*, 240(3):718–733, feb 2015.
- [Bruglieri *et al.* 2014] Maurizio Bruglieri, Alberto Colorni and Alessandro Luè. The Vehicle Relocation Problem for the One-way Electric Vehicle Sharing: An Application to the Milan Case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111:18–27, feb 2014.
- [Cauwer *et al.* 2015] Cedric De Cauwer, Joeri Van Mierlo and Thierry Coosemans. Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles Based on Real-World Data. (August), 2015.
- [CE 2014] CE. Europe on the Move: Connected and Automated Mobility - For a more competitive Europe. *Nature*, 219(5157):881–882, 2014.
- [Chen *et al.* 2016] T. Donna Chen, Kara M. Kockelman and Josiah P. Hanna. Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94:243–254, dec 2016.
- [CIM-Aveiro 2014] CIM-Aveiro. CI Região de Aveiro — Documentos — Plano Inter-municipal de Mobilidade e Transportes da Região de Aveiro. 2014.
- [Cohen *et al.* 2012] Adam Cohen, Susan A Shaheen, Mark A Mallery and Karla J Kingsley. Carsharing and Personal Vehicle Services : Worldwide Market Developments and Emerging Trends Research in Transportation Business & Management Personal vehicle sharing services in North America. *RTBM*, (June), 2012.
- [Correia *et al.* 2016] Correia, Gonçalo Homem de Almeida and Bart van Arem. Solving the User Optimum Privately Owned Automated Vehicles Assignment Problem (UO-POAVAP): A model to explore the impacts of self-driving vehicles on urban mobility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 87:64–88, 2016.
- [EDP 2017] EDP. Relatório Sustentabilidade EDP. [https://www.edp.com/sites/default/files/portal.com/relatorio\\_de\\_sustentabilidade\\_2017\\_pt.pdf](https://www.edp.com/sites/default/files/portal.com/relatorio_de_sustentabilidade_2017_pt.pdf), 2017.
- [EDP 2018] EDP. Rotulagem EDP. <https://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Folhetos%20de%20Rotulagem/Rotulagem%20de%20energia%20el%C3%A9ctrica%20EDP%20SU%202018.pdf>, 2018.
- [EMISIA 2019] EMISIA. EMISIA - Copert Data, Vehicle fleet and activity data for the EU. <https://www.emisia.com/utilities/copert-data/>, 2019.



- [Ericsson 2019] Ericsson. The future of connected vehicles lies with 5G. 2019.
- [ERSE 2019] ERSE. Portal ERSE - Informação de suporte aos comercializadores disponibilizada pela ERSE. <http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/rotulagemenergetica/informacaodesuporte/Paginas/default.aspx>, 2019.
- [European Commission 2018] European Commission. EU energy in figures - Publications Office of the EU. 2018.
- [Fagnant *et al.* 2014] Fagnant, Daniel J. and Kara M. Kockelman. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40:1–13, mar 2014.
- [Fagnant *et al.* 2015] Fagnant, Daniel J. and Kara Kockelman. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77:167–181, jul 2015.
- [Fagnant *et al.* 2018] Fagnant, Daniel J., Kockelman and Kara M. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1):143–158, jan 2018.
- [Farhan *et al.* 2018] Farhan, J. and T. Donna Chen. Impact of ridesharing on operational efficiency of shared autonomous electric vehicle fleet. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93:310–321, aug 2018.
- [Ferreira 2012] Ana Ferreira. Estimaco de emisses de tráfego através de micro simulaco e sua comparaco com os resultados obtidos pela macro simulaco, 2012.
- [FHWA 2010] FHWA. The Travel Model Improvement Program - Travel Model Validation and Reasonability Checking Manual Second Edition, September 24 2010 - Federal Highway Administration. 2010.
- [Fiori *et al.* 2019] Chiara Fiori, Vincenzo Arcidiacono, Georgios Fontaras, Michail Makridis, Konstantinos Mattas, Vittorio Marzano, Christian Thiel and Biagio Ciuffo. The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67:275–290, feb 2019.
- [Fontaras *et al.* 2017] Georgios Fontaras, Nikiforos-Georgios Zacharof and Biagio Ciuffo. Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60:97–131, may 2017.
- [GALP 2017] GALP. Rotulagem GALP 2017. [https://casa.galp.pt/sites/default/files/faqs/rotulagem\\_energia\\_eletrica\\_2017.pdf](https://casa.galp.pt/sites/default/files/faqs/rotulagem_energia_eletrica_2017.pdf), 2017.
- [Gartner 2018] Gartner. Carsharing Trend: An Overview of Carshare Past, Present, Future. <http://movmi.net/carsharing-trend-past-present-future/>, 2018.

- [Gentile *et al.* 2009] Gentile, Guido and Klaus Noekel. Linear User Cost Equilibrium: the new algorithm for traffic assignment in VISUM - ResearchGate, Conference Paper. 2009.
- [GoogleRoutes 2017] GoogleRoutes. Google Maps now tells you how long a future trip will take — Android Central. <https://www.androidcentral.com/google-maps-wants-tell-how-long-your-route-will-now-or-later>, 2017.
- [Greenblatt *et al.* 2015a] Greenblatt, Je B and Samveg Saxena. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. (July), 2015.
- [Greenblatt *et al.* 2015b] Greenblatt, Jeffery B and Susan Shaheen. Automated Vehicles , On-Demand Mobility , and Environmental Impacts. (February 2016), 2015.
- [Guardian 2019] Guardian. Amsterdam to ban petrol and diesel cars and motorbikes by 2030. 2019.
- [Hamilton 2015] L H M Hamilton. Self-driving vehicles as public transport in Rotterdam. 2015.
- [Hardinghaus *et al.* 2016] Michael Hardinghaus, Hermann Blümel and Christian Seidel. Charging Infrastructure Implementation for EVs – the Case of Berlin. *Transportation Research Procedia*, 14:2594–2603, jan 2016.
- [Iacobucci *et al.* 2018] Riccardo Iacobucci, Benjamin McLellan and Tetsuo Tezuka. Modeling shared autonomous electric vehicles: Potential for transport and power grid integration. *Energy*, 158:148–163, sep 2018.
- [IMT2017] Relatório de tráfego na rede nacional de autoestradas 1<sup>o</sup> Trimestre de 2017. 2017.
- [International 2019] KPMG International. Mobility 2030: Transforming the mobility landscape. 2019.
- [Investopedia 2019 ] Investopedia 2019. Uber and Google’s Waymo in Talks About Partnership.
- [Jordan *et al.* 2013] William C Jordan, Jordan Analytics Llc and Bonnie A Scarborough. Transforming Personal Mobility. 2013.
- [Jorge *et al.* 2014] Diana Jorge, Gonçalo H A Correia and Cynthia Barnhart. Comparing Optimal Relocation Operations With Simulated Relocation Policies in One-Way Carsharing Systems - ResearchGate - Conference Paper. pp. 1–9, 2014.
- [JPMorgan 2018] JPMorgan. Driving into 2025: The Future of Electric Vehicles — J.P. Morgan. 2018.
- [Jung *et al.* 2014] Jung, Jaeyoung, Joseph Y.J. Chow, R. Jayakrishnan and Ji Young Park. Stochastic dynamic itinerary interception refueling location problem with queue delay for electric taxi charging stations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40:123–142, mar 2014.

- [KPM2019] Mobility 2030: Transforming the mobility landscape — KPMG Global. *KPMG*, feb 2019.
- [Kpvcrow 2017] Kpvcrow. Parkeren en gedrag. <https://www.crow.nl/downloads/documents/kpvc-kennisdocumenten/publicatie-parkeren-en-gedrag-2017?ext=.pdf>, 2017.
- [Levin *et al.* 2017] Michael W. Levin, Kara M. Kockelman, Stephen D. Boyles and Tianxin Li. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64:373–383, jul 2017.
- [Litman 2013] Todd Litman. Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning. 2013.
- [Loeb *et al.* 2018] Benjamin Loeb, Kara M. Kockelman and Jun Liu. Shared autonomous electric vehicle (SAEV) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89:222–233, apr 2018.
- [Looft *et al.* 2018] Erwin Looft, Gonçalo Correia Homem de Almeida, Sander van Cranenburgh, Maaike Snelder and Bart van Arem. Potential changes in value of travel time as a result of vehicle automation: a case study in the Netherlands, Research Gate - Conference Paper. *TRB 97th Annual Meeting Compendium of Papers*, 31(15), 2018.
- [Macedo *et al.* 2019] Eloisa Macedo, Ricardo Tomás, Margarida C. Coelho Paulo Fernandes and Jorge M. Bandeira. Quantifying road traffic emissions embedded in a multi-objective traffic assignment model, ScienceDirect - Transportation Research Procedia. 2019.
- [Mak *et al.* 2013] Mak, Ho-yin and Zuo-jun Max Shen. Infrastructure Planning for Electric Vehicles with Battery Swapping. pp. 1–32, 2013.
- [Martinez *et al.* 2017] Martinez, Luis M. and José Manuel Viegas. Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1):13–27, jun 2017.
- [McKinsey 2016] McKinsey. Automotive revolution-perspective towards 2030; accessed on April 28 2019. <https://www.mckinsey.com/media/mckinsey/industries/hightech/ourinsights/disruptivetrendsthatwilltransformtheautoindustry/auto2030reportjan2016.ashx>, 2016.
- [Milakis *et al.* 2015] Dimitris Milakis, Maaike Snelder, Bart Van Arem, Bert Van Wee and Gonçalo Homem De Almeida Correia. Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. *European Journal of Transport & Infrastructure Research*, in press(1):63–85, 2015.

- [Ministry of Road Transport & Highways-India 2019] Ministry of Road Transport & Highways-India. Causes of Road Accidents — Transport Department, Government of Jharkhand. 2019.
- [Moreno *et al.* 2018] Ana T. Moreno, Andrzej Michalski, Carlos Llorca and Rolf Moeckel. Shared Autonomous Vehicles Effect on Vehicle-Km Traveled and Average Trip Duration. *Journal of Advanced Transportation*, 2018:1–10, may 2018.
- [Nie *et al.* 2013] Nie, Yu (Marco) and Mehrnaz Ghamami. A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57:172–190, nov 2013.
- [Nieuwenhuijsen *et al.* 2018] Jurgen Nieuwenhuijsen, Gonçalo Homem de Almeida Correia, Dimitris Milakis, Bart van Arem and Els van Daalen. Towards a quantitative method to analyze the long-term innovation diffusion of automated vehicles technology using system dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86:300–327, jan 2018.
- [Nykvist *et al.* 2015] Nykvist, Björn and Måns Nilsson. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. (February):1–13, 2015.
- [OpenStreetMap ] OpenStreetMap. OpenStreetMap; accessed on February 16 2019. <https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.602/-7.839>.
- [Overtoom 2018] Irene Overtoom. Assessing the impact of shared and autonomous vehicles on urban traffic: A simulation approach, 2018.
- [Park *et al.* 2005] Park, Hongtu Qi and Byungkyu. Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models - ResearchGate - Article, 2005.
- [Parlamento-Europeu 2019] Parlamento-Europeu. Carros autónomos na União Europeia: da ficção científica à realidade. 2019.
- [PIMP-Coimbra 2016] PIMP-Coimbra. PIMT – Plano Intermunicipal de Mobilidade e Transportes – CIM – Região de Coimbra. 2016.
- [PTVGroup-VISUM ] PTVGroup-VISUM. Shape the Future Mobility — PTV Visum; accessed on February 21 2019. <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-visum/areas-of-application/future-mobility/>.
- [PWC-Report 2018] PWC-Report. By 2030, the transport sector will require 138 million fewer cars in Europe and the US; accessed on May 8 2019. <https://www.pwc.com/sk/en/current-press-releases/by-2030-transport-sector-will-require-138-million-fewer-cars.html>, 2018.
- [Reiter *et al.* 2016] Reiter, Matthew S and Kara M. Kockelman. Emissions and Exposure Costs of Electric versus Conventional Vehicles - A Case Study for Texas; International Journal of Sustainable Transport - Article. 2016.
- [Rodrigue *et al.* 2013] Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois and Brian Slack. The geography of transport systems. p. 439, 2013.

- [SAE 2018] SAE. SAE International Releases Updated Visual Chart for Its “Levels of Driving Automation” Standard for Self-Driving Vehicles. 2018.
- [Saleh *et al.* 2013] Louay Saleh, Philippe Chevrel, Fabien Claveau, Jean Francois Lafay and Franck Mars. 2013.
- [Schroder *et al.* 2014] Christine Schroder, Martin Kagerbauer, Nicolas Reiß, Rimbert Reuter, Christian and Steven Pfisterer. Developing and Evaluating Intermodal E-Sharing Services—A Multi-method Approach, 2014.
- [Shaheen *et al.* 2018] Shaheen, Susan and Adam Cohen. Innovative Mobility Carsharing Outlook, Transportation Sustainability Research Center - Conference. pp. 1–8, 2018.
- [Škugor *et al.* 2016] Škugor, Branimir and Joško Deur. A bi-level optimisation framework for electric vehicle fleet charging management. *Applied Energy*, 184:1332–1342, dec 2016.
- [Steven E. Shladover 2016] Steven E. Shladover. The Truth about ”Self-Driving” Cars - Scientific American. 2016.
- [Talebpour *et al.* 2016] Talebpour, Alireza and Hani S. Mahmassani. Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71:143–163, oct 2016.
- [TRBSpecial 2000] TRBSpecial. Highway capacity manual. *Environmental Protection*, p. 1207, 2000.
- [Tu *et al.* 2016] Wei Tu, Qingquan Li, Zhixiang Fang, Shih-lung Shaw, Baoding Zhou and Xiaomeng Chang. Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial–temporal demand coverage approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65:172–189, apr 2016.
- [Underwood *et al.* 2014] S.E. Underwood, S. Marshall and J. Niles. Automated, Connected, and Electric Vehicles: An Assessment of Emerging Transportation Technologies and a Policy Roadmap for More Sustainable Transportation A report for the. (December):60, 2014.
- [VISUMFundamentals ] VISUMFundamentals. VISUM 12.5 Fundamentals; accessed on February 21 2019. <https://books.google.pt/books?id=HIjx90pU7RwC>.
- [Vosooghi *et al.* 2019] Reza Vosooghi, Jakob Puchinger, Marija Jankovic and Anthony Vouillon. Shared autonomous vehicle simulation and service design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107:15–33, oct 2019.
- [WebPlotDigitizer 2019] WebPlotDigitizer. WebPlotDigitizer - Extract data from plots, images, and maps; accessed on April 4 2019 . <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>, 2019.
- [Weiss *et al.* 2017] Jürgen Weiss, Ryan Hledik, Roger Lueken, Tony Lee and Will Gorman. The electrification accelerator: Understanding the implications of autonomous vehicles for electric utilities. *The Electricity Journal*, 30(10):50–57, dec 2017.

- [WHO 2018] WHO. World Health Statistics 2018: Monitoring health for the SDGs. [https://www.who.int/gho/publications/world\\_health\\_statistics/2018/en/](https://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2018/en/), 2018.
- [Wieczorek *et al.* 2012] Wieczorek, Anna J and Wieczorek. Systemic instruments for systemic innovation problems: A framework for policy makers and innovation scholars. *Science and Public Policy*, 39:74–87, 2012.
- [WorldConference 2019] WorldConference. Mobility Solutions 2020-2030. Urban Air Mobility Hyperloops and the challenge for rail mobility as a service (MaaS) Sustainability in transportation the international conference looking at future transportation concepts & solutions, 2019.
- [WSDOT 2011] WSDOT. Peak Hour Report. 2011.
- [Wu *et al.* 2012] Ye Wu, Zhengdong Yang, Bohong Lin, Huan Liu, Renjie Wang, Boya Zhou and Jiming Hao. Energy consumption and CO2 emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China. *Energy Policy*, 48:537–550, sep 2012.
- [Xiang *et al.* 2016] Yue Xiang, Junyong Liu, Ran Li, Furong Li, Chenghong Gu and Shuoya Tang. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates. *Applied Energy*, 178:647–659, sep 2016.
- [Yi *et al.* 2018] Yi, Zonggen and Matthew Shirk. Data-driven optimal charging decision making for connected and automated electric vehicles: A personal usage scenario. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86:37–58, jan 2018.
- [Zhang *et al.* 2015] Wenwen Zhang, Subhrajit Guhathakurta, Jinqi Fang and Ge Zhang. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 19:34–45, dec 2015.
- [Zhou *et al.* 2017] Fan Zhou, Zuduo Zheng, Jake Whitehead, Robert Perrons, Lionel Page and Simon Washington. Projected prevalence of car-sharing in four Asian-Pacific countries in 2030: What the experts think. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 84:158–177, nov 2017.

# Apêndice A

## Anexos

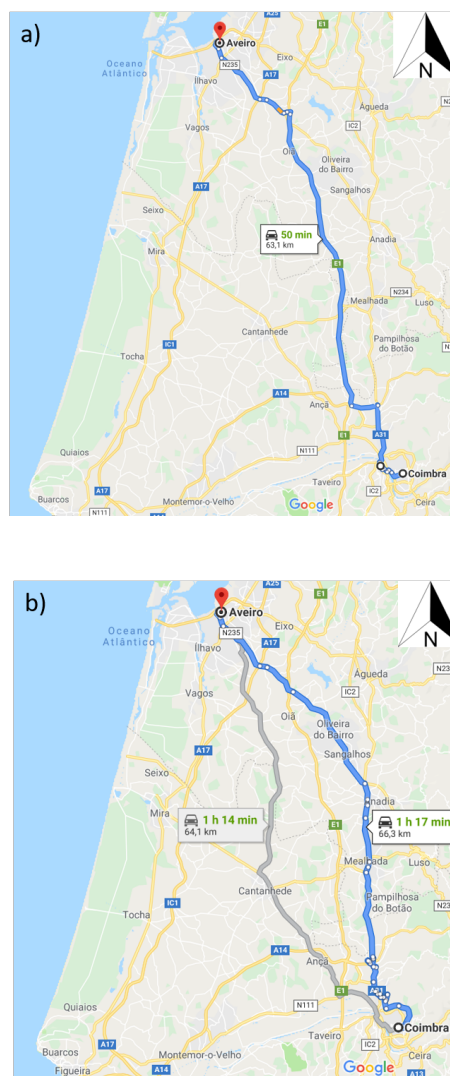


Figura A.1: a) Rota 1 - A1, b) Rota 2 - N235/IC2 [Fonte:Google Maps]

	Vagos	Ílhavo	Aveiro	Águeda	Oliveira do Bairro	Mira	Cantanhede	Coimbra	Penacova	Mealhada	Anadia	Montemor-o-Velho
Vagos	5.10	11.50	12.37	29.06	34.90	23.37	37.13	47.72	58.53	37.11	30.04	53.49
Ílhavo	11.45	6.48	7.03	24.34	30.18	23.09	36.02	43.00	53.81	32.39	25.32	49.76
Aveiro	13.83	8.22	10.62	23.98	29.82	23.98	36.90	42.64	53.45	32.03	24.96	49.40
Águeda	28.91	24.79	23.91	14.44	23.54	33.53	39.42	45.94	53.21	25.76	18.69	53.66
Oliveira do Bairro	34.86	30.73	29.86	23.60	9.78	39.31	44.70	38.70	45.97	18.52	11.44	47.83
Mira	23.37	25.33	24.45	33.97	39.16	13.50	36.36	49.66	63.49	40.40	33.33	52.71
Cantanhede	37.42	37.70	37.35	39.32	44.50	36.77	24.74	52.94	68.72	44.98	39.51	55.99
Coimbra	47.58	43.45	42.58	45.92	38.75	49.69	52.93	19.56	41.20	34.24	30.54	33.97
Penacova	49.55	45.43	44.56	47.69	40.52	54.61	60.15	32.86	14.76	39.03	32.31	40.81
Mealhada	37.02	32.90	32.02	25.77	18.60	40.48	44.91	34.27	45.88	11.66	10.38	38.57
Anadia	29.97	25.85	24.98	18.72	11.55	33.43	39.60	30.49	38.85	10.31	1.94	39.63
Montemor-o-Velho	53.51	50.43	49.56	53.96	47.72	52.86	56.09	34.08	49.29	38.60	39.50	22.14

Tabela A.1: Lista dos tempos de viagem simulados

	Vagos	Ílhavo	Aveiro	Águeda	Oliveira do Bairro	Mira	Cantanhede	Coimbra	Penacova	Mealhada	Anadia	Montemor-o-Velho
Vagos		12	18	30	24	20	35	50	50	30	30	40
Ílhavo	11		13	30	24	24	40	50	50	35	35	45
Aveiro	19	13		30	24	26	35	45	45	30	30	45
Águeda	30	30	28		18	35	40	50	50	30	22	50
Oliveira do Bairro	24	24	24	18		30	35	40	45	20	14	45
Mira	20	24	26	35	30		18	40	45	35	40	30
Cantanhede	35	40	35	45	35	20		28	35	20	30	24
Coimbra	45	45	45	45	40	40	26		30	27	35	30
Penacova	50	50	50	54	45	45	35	30		35	40	40
Mealhada	34	35	34	29	20	35	20	28	35		14	35
Anadia	35	35	35	26	16	40	35	35	40	16		40
Montemor-o-Velho	45	45	45	50	45	40	26	35	45	35	45	

Tabela A.2: Lista dos tempos de viagem observados

	Vagos	Ílhavo	Aveiro	Águeda	Oliveira do Bairro	Mira	Cantanhede	Coimbra	Penacova	Mealhada	Anadia	Montemor-o-Velho
Vagos		0.04	0.41	0.09	0.40	0.11	0.16	0.03	0.10	0.12	0	0.34
Ílhavo	0.04		0.46	0.24	0.21	0.08	0	0.12	0.02	0.02	0.28	0.11
Aveiro	0.27	0.37		0.20	0.15	0.14	0.05	0.13	0.01	0.03	0.17	0.10
Águeda	0.12	0.27	0.28		0.38	0.14	0.12	0.13	0.07	0.11	0.15	0.07
Oliveira do Bairro	0.34	0.18	0.15	0.39		0.23	0.35	0.14	0.06	0.12	0.18	0.06
Mira	0.11	0.03	0.09	0.13	0.26		0.82	0.15	0.32	0.30	0.17	0.76
Cantanhede	0.17	0.02	0.04	0.09	0.39	0.84		0.76	1.02	1.65	0.32	1.33
Coimbra	0.07	0.16	0.17	0.15	0.14	0.10	0.71		0.37	0.27	0.13	0.13
Penacova	0.03	0.13	0.14	0.12	0.14	0.16	0.88	0.17		0.35	0.19	0.02
Mealhada	0.09	0.06	0.06	0.11	0.07	0.23	1.36	0.27	0.43		0.26	0.10
Anadia	0.14	0.26	0.29	0.28	0.28	0.16	0.13	0.13	0.03	0.36		0.01
Montemor-o-Velho	0.19	0.12	0.10	0.08	0.06	0.32	1.16	0.03	0.10	0.10	0.12	

Tabela A.3: Lista dos erros dos tempos de viagem simulados



Autoestrada	Troço	Valores IMT	Valores VISUM
<b>A1</b>	Coimbra Norte - Mealhada	2378.5	3002
	Mealhada – Aveiro Sul	2328	3244
	Aveiro Sul - Albergaria	2100	2070
<b>A14</b>	Montemor-o-Velho – EN 335	335.9	606
	EN 335 – Ançã	358.1	430
	Ançã – Coimbra Norte	647.3	1217
	Coimbra Norte – Zombaria	1486	1428
<b>A17</b>	Quiaios – Tocha	540.6	1204
	Tocha – Mira	556.8	1204
	Ponte de Vagos – Vagos	903.2	2571
	Vagos – Ilhavo	923.5	2300
	Ilhavo – Aveiro Sul	1397.5	2206
	Aveiro Sul – S. Bernardo	1028.3	1627
	S. Bernardo – Aveiro Nascente (A17/A25)	1142.8	1627
<b>A25</b>	Barra – Zona Industrial	2115.4	1462
	Zona Industrial – Gafanha da Nazaré	2115.4	1367
	Gafanha da Nazaré – Pirâmides	3059.7	1635
	Pirâmides – Esgueira	2216.4	1713
	Zona Industrial de Aveiro – Angeja Poente	2240	1837
	Angeja (A25/A29) – Albergaria (A1/A25)	1589.2	2407
	Albergaria (A1/A25) – A25/IC2	1437.7	1508
	A25/IC2 – Carvoeiro	1421.2	899
	Carvoeiro – Talhadas	1120.8	899

Tabela A.4: Lista dos volumes de tráfego observados e simulados

		1. (0/0/0)	2. (22.5/0/0)	3. (33/0/0)	4. (50/0/0)	5. (0/0/25)	6. (0/0/35)	7. (0/2/0)	8. (0/18/0)	9. (0/20/0)	10. (33/0/35)	11. (0/18/35)	12. (33/18/0)	13. (33/18/35)
Rota 1	CO2(g/link.h)	1.25E+07	1.21E+07	1.10E+07	1.03E+07	1.38E+07	1.44E+07	1.24E+07	1.10E+07	1.08E+07	1.24E+07	1.26E+07	9.71E+06	1.10E+07
	NOX(g/link.h)	3.51E+04	3.41E+04	3.16E+04	3.16E+04	3.86E+04	4.06E+04	3.44E+04	2.92E+04	2.86E+04	3.72E+04	3.39E+04	2.64E+04	3.11E+04
Rota 2	CO2(g/link.h)	5.51E+06	5.02E+06	4.18E+06	3.37E+06	4.73E+06	4.80E+06	5.43E+06	4.81E+06	4.73E+06	2.44E+06	4.14E+06	3.61E+06	2.27E+06
	NOX(g/link.h)	1.62E+04	1.50E+04	1.26E+04	1.01E+04	1.27E+04	1.30E+04	1.59E+04	1.35E+04	1.32E+04	7.07E+03	1.08E+04	1.32E+02	5.99E+03

Tabela A.5: Emissões do sistema por cenário

		1. (0/0/0)	2. (22.5/0/0)	3. (33/0/0)	4. (50/0/0)	5. (0/0/25)	6. (0/0/35)	7. (0/2/0)	8. (0/18/0)	9. (0/20/0)	10. (33/0/35)	11. (0/18/35)	12. (33/18/0)	13. (33/18/35)
Rota 1	CO2 (g/km.veh)	9.36E+03	9.33E+03	9.24E+03	9.43E+03	9.33E+03	9.33E+03	9.23E+03	8.19E+03	8.06E+03	9.30E+03	8.18E+03	8.16E+03	8.24E+03
	NOX (g/km.veh)	2.65E+01	2.66E+01	2.67E+01	2.88E+01	2.65E+01	2.67E+01	2.61E+01	2.21E+01	2.17E+01	2.79E+01	2.22E+01	2.23E+01	2.34E+01
Rota 2	CO2 (g/km.veh)	6.55E+03	6.42E+03	6.31E+03	6.31E+03	6.11E+03	6.18E+03	6.48E+03	5.86E+03	5.78E+03	3.49E+03	5.46E+03	5.59E+03	3.31E+03
	NOX (g/km.veh)	1.92E+01	1.90E+01	1.88E+01	1.87E+01	1.68E+01	1.71E+01	1.89E+01	1.61E+01	1.58E+01	1.01E+01	1.43E+01	1.57E+01	8.88E+00

Tabela A.6: Emissões por veículo por cenário